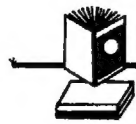


جون ر. بيرس

# مقدمة إلى نظرية المعلومات

الرموز، الإشارات، والضجيج

ترجمة:  
المهندس فايز فوه العاوة

 منشورات وزارة الثقافة  
في الجمهورية العربية السورية  
دمشق ١٩٩١

# AN INTRODUCTION TO INFORMATION THEORY

Symbols, Signals & Noise

JOHN R. PIERCE

Professor of Engineering  
California Institute of Technology

Second, Revised Edition

---

An Introduction to = مقدمة الى نظرية المعلومات  
Information theory : الرموز ، الاشارات والضجيج / تأليف  
جون . ر . بيرس ، ترجمة فايز فوق العادة . - دمشق : وزارة الثقافة ،  
١٩٩٠ - ٣٦٨ ص : موضح ، ٢٤ سم - ( علوم ، ٤ ) .

١ - ١٥٣٠ ب ي ر م ٢ - العنوان ٣ - بيرس ٤ - فوق المادة  
٥ - السلسلة .

مكتبة الاسد

---

الايداع القانوني ع - ٣٩٩ / ٥ / ١٩٩٠

إهداء المؤلف

إلى كلود  
وبيتي شانون





## مقدمة المؤلف

ان اعادة نشر هذا الكتاب اتاح لي الفرصة لتصحيح كتاب سابق كنت قد الفته منذ حوالي عشرين سنة بعنوان : الرموز ، الاشارات والفصيح ، واعادة النظر فيه بحيث يصبح متمشيا مع الوضع الراهن من التطور . ونظرا لان الكتاب يتعلق بعمل شاتون بشكل رئيسي ، والذي سيبقى خالدا الى الابد ، فان اعادة النظر في مؤلفي السابق لم يترتب عليها اجراء الكثير من التغييرات ، ففي بعض الاماكن غيرت التواريخ الخاصة ببعض العلماء الذين نوفوا ، الا انني لم احاول استبدال مصطلح هزة في الثانية ( هـ / نا ) بالمصطلح الاحداث هرتز / ثانية ( هر / نا ) وكذا لم ابدل في كل المواضع مصطلح شاتون : نظرية الاتصالات بالمصطلح الاحداث الذي استخدمه اليوم : نظرية المعلومات .

لقد قمت بتغيير بعض الاشياء ، كاعادة كتابة بعض الفقرات وحوالي عشرين صفحة دون تغيير في ترقيم الصفحات .

ففي الفصل العاشر : نظرية المعلومات والفيزياء ، قمت بتغيير درجة حرارة خلفية الكون من ( درجتين كلفين الى اربع درجات ) وفق كتابي السابق ( لا اعلم من اين اتيت بهذا التقدير في حينه ) ، الى القيمة الصحيحة ٢.٥ كلفين ، كما حددها بنزائيس وويلسون . واستنادا لحقيقة انه فسي غياب الفصيح يمكننا ان نبث عدد لا حصر له من واحداث البيت في كل واحدة كم ، فقد اضفت مادة جديدة عن التأثيرات الكمية في الاتصالات . كما قمت باستبدال مثال قديم عن الاتصال الفضائي بتحليل مختصر للبث الميكروي لاشارات الصور من مركبة فويجر بقرب المشتري ، كذلك عرضت احتمالات جديدة .

اما في الفصل السابع المعنون « الترميز الفعال » فقد اعدت كتابة بعض الصفحات المتعلقة بالترميز الفعال لمصادر التلفزة وغمرت بعض الفقرات الخاصة بتعديل الترميز النبضي ومرمزات الاصوات . كذلك غمرت في المادة المتعلقة ببحث تصحيح الاخطاء بواسطة الترميز .

وفي الفصل الحادي عشر ، فصل السيبرنيتيك ، اعدت كتابة اربع صفحات عن الحاسبات الالكترونية والبرمجة والتي تقدمت بشكل يفوق التصور خلال العشرين سنة الماضية .

وأخيرا فقد اجريت بعض التغييرات الطفيفة في الفصل السادس عشر القصير والاخير : عودة الى نظرية الاتصالات .

وعلى خلفية هذه التغييرات الفت نظر القارئ الى سلسلة من الابحاث في تاريخ نظرية المعلومات نشرت في دوريات علمية بعنوان محاضر عن نظرية المعلومات وكذلك الى كتابين هامين يتحدثان بتفصيل اكبر عن الوضع الراهن لنظرية المعلومات والجوانب الرياضية للاتصالات هما : نظرية المعلومات والترميز مؤلفه روبرت ماك اليس ، ومبادئ الاتصالات الرقمية والترميز مؤلفه اندريه فيتري .

ان عدداً من فصول الكتاب الاصلي تتعلق بمواضيع لا تبرز اهميتها الا من خلال تطبيق او محاولة تطبيق نظرية المعلومات .

اعتقد ان الفصل الثاني عشر : نظرية المعلومات وعلم النفس يعطي فكرة معقولة عن نوع التطبيقات الجارية في ذلك المجال . لقد اصبح علماء النفس المعاصرون اقل اهتماما بنظرية المعلومات بالمقارنة مع علم الادراك ، لافكار مستمدة من علم اصل الانسان واللغويات ، كما يستند الى اعتقاد جازم بان نظاما رياضيا بسيطا وفعالا يكمن في خلفية الوظائف الانسانية . يذكرني علم الادراك المعاصر بعلم السيبرنيتيك قبل عشرين سنة . اما فيما يتعلق بنظرية المعلومات والفن ، فقد حل الكمبيوتر اليوم محل نظرية المعلومات بشكل جزئي ، الا ان المعلومات المتناولة في الفصل

الثالث عشر قد تم تعميقها . ساستعرض بعض الأشعار الجذابة التي انتجتها ماري بوروف ، وفاعرج على الاخص على بعض قواعد الاغاني الشعبية السويدية التي استطاع يوهان ساندبيرغ بواسطتها انتاج عدد من الالحن الاصيله الجميله .

يعود ذلك بنا الى اللغة والفصل السادس : اللغة والمعنى . لقد طرح ذلك الفصل مجموعة من المشاكل لم تحل خلال العشرين سنة الماضية . اننا لا نملك جملة كاملة من القواعد لاي لغة طبيعية ، في حين ان القواعد الحرفية والشكلية اثبتت فعاليتها وبشكل ناجح في لغات الكمبيوتر . لقد تحول الاهتمام في مجال اللغويات ، وفق ما ارى ، الى اعتبارات التصويت في اللغة المنطوقة ، ما هي اهم التراكيب الصوتية وكيف تتفاعل مع بعضها ، ولعل هذه الابحاث من الاهمية بمكان في مجال الكمبيوتر ، اذ يمكن بواسطتها استنتاج الطرق الكفيلة بجعل الكمبيوتر ينطق نصا مكتوباً في ذاكرته . لقد كتب شومسكي وهال كتابا واسعا عن النبرات ، وتناول الموضوع ليبرمان وبرنس في تقرير متكامل مختصر .

هذا هو كل ما يتعلق بالتغيرات التي اجريتها على الكتاب الاصلي : الرموز ، الاشارات ، والضجيج ، وعدا ذلك اعود لكرر بعض ما ذكرته في مقدمة ذلك الكتاب .

لقد سررت فعلا عندما اقترح ر. نيومان ان اقوم بتأليف كتاب عن الاتصالات ، وكان ملهمي في عملي التكنيكي هذا الجانب او ذاك من موضوع الاتصالات . وفعلا شعرت ان من واجبي ان انقل الى القراء ما هو اكثر امتاعا وامتناعا من هذا الموضوع . لم يكن تحقيق هذا الهدف امرا سهلا ، سيما قبل عام ١٩٤٨ ، حين اصدر كلود شانون كتابه : ( نظرية رياضية للاتصالات ) . فقد جمعت نظرية شانون في الاتصالات ، والتي عرفت فيما بعد بنظرية المعلومات ، وفي بوتقة واحدة ، كل المشاكل التي كانت قد ادرت مهندسي الاتصالات لسنوات نعم ، كان بإمكان هذه النظرية ان تخلق نظاما جديدا محددا وواضحا وان تحل محل جملة

سابقة من المسائل الخاصة والأفكار المشتتة والتي كان الارتباط بينها غامضاً وغير مفهوم . ولا يستطيع أحد اتهامه بأنني من أتباع شانون ، دون نيته مكافأة فعلية لقاء ذلك الاتهام .

وهكذا تملكنتني قناعة كاملة بأن تقريرتي عن الاتصالات يجب أن يعكس وبشكل أمين نظرية المعلومات كما صاغها شانون . وكان على تقريرتي أن يكون أوسع من عمل شانون بتبيينه مدى ارتباط النشاطات الفكرية الانسانية المختلفة بنظرية المعلومات ، وكذلك أن يكون أعرض بابتعاده ما أمكن عن الزعم الرياضي المحض .

هنا برز التناقض . أن تقريرتي يجب أن يكون أقل رياضية من تقرير شانون ، إلا أنه ليس بإمكانه أن يكون غير رياضي البتة ، فنظرية المعلومات هي نظرية رياضية تنطلق من فرضيات معينة تصف جوانب من الاتصالات التي ستعرض إليها ، وتصوغ باستخدام هذه الفرضيات استنتاجات منطقية متنوعة . تتجلى عظمة نظرية المعلومات في نظريات رياضية محددة غاية في الأهمية ومدهشة . وما أشبه الحديث عن نظرية المعلومات دون الاقتراب من جهازها الرياضي بالحديث عن مؤلف موسيقي عظيم دون اسماع الآخرين بعضاً من أعماله .

كيف تسنى لي أن اتحرك إلى هدي ؟ بدا أن الكتاب يجب أن يكون محتوى في ذاته ، أي يجب أن يحقق فهم الرياضيات التي ينطوي عليها دون العودة إلى مراجع أخرى أو تذكر بعض مضامين كتب الرياضيات المدرسية ، ككتب المرحلة الثانوية مثلاً . هل يعني ذلك امتناعي عن ذكر أي علاقة رياضية ، كلا بالطبع ، بل يعني أن أعرض الجوانب الرياضية ببساطة وبلغة أولية . لقد فعلت ذلك في متن الكتاب وفي الملحق عند نهاية وباختصار يستطيع أي قارئ غير متمرس بالرياضيات أن يحصل أي أشكال بينه وبين الكتاب بمجرد التنقل بين المتن والملحق .

ماهي حدود الصعوبة التي كان عليّ ألاّ أتجاوزها ، كان عليّ أن أحدد بشكل مسبق أعقد علاقة رياضية سأعرض لها ، وهذا يعني تجاوز

بعض النقاط الهامة ، ومهما يكن من امر ، فقد بقي مؤلفي اسهل بدرجة كبيرة من الاقسام الصعبة من كتاب «عالم الرياضيات» مؤلفه نيومان . اما حيث تبلغ المعالجة مدى متقدماً من التعميد فقد آثرت عرض الخطوط العامة للرياضيات على تفصيل مضمونها .

على كل حال ، يتضمن هذا الكتاب بعض المقاطع الصعبة لغير الملم بالرياضيات ، وانصح القارئ في هذه الحالة بتجاوز تلك المقاطع مكتفياً بنتائجها وحسب . وسيعرف كل القراء حين بلوغ نهاية الكتاب ان ايراد المقاطع الصعبة كان امراً لا مفر منه ، ولعل فهم تلك المقاطع سيكون اكثر يسراً في القراءة الثانية للكتاب . ولو انني لم اضمن كتابي تلك المقاطع لما تمكن القارئ من بلوغ المستوى من فهم الموضوع الذي سيحققه بعد دراسة الكتاب . اما المؤلفات الاخرى في نظرية المعلومات فهي في حدود معرفتي إما غاية في البساطة وإما صعبة لدرجة ان القارئ الجاد وغير الخبير لن يستطيع اجتياز الاقسام السهلة المقابلة للاقسام السهلة من كتابي . اجد من واجبي ان اذكر ان بعض المؤلفات الاخرى في نظرية المعلومات مريكة بحق او هي خاطئة تماماً .

سيبرز ولا شك ، في هذه المرحلة ، تساؤل هام لدى القارئ ، عما اذا كانت نظرية المعلومات تستحق منه او من المؤلف كل هذا العناء . وكل ما استطيع قوله في هذا السياق هو ان نظرية المعلومات تساوي في الاهمية العلم والتكنولوجيا ، لان نظرية المعلومات جزء من عالم العلم والتكنولوجيا . ولعلها مهمة القارئ ان يحاول تكوين صورة مفهومة عن الموضوع والى الحد الذي يريد ، اذا كانت لديه رغبة أكيدة بسبر عالم المعرفة والتكنولوجيا . ان صورة نظرية المعلومات يجب الا تبدو غريبة وغير مفهومة كما ان ادراكها يجب الا يكون سهلاً ودون توظيف ما يلزم من الجهد .

لم يكن تأليف هذا الكتاب امراً يسيراً ، وربما تعلم إنجازه لولا سابقه مؤلف كلود شانون . لقد ساهم كلود شانون مساهمة كبيرة في اخراج

الكتاب بقراءته وفي إسداء النصح حول ما يتعلق بضرورة اجراء بعض التغييرات فيه ، اما دافيد سليبيان فقد اخرجني عن مسارب الخطا بشكل حاسم في حين نهني اي . ن . جيلبرت الى الفلظ في اكثر من مناسبة . راجع ميلتون باييت الفصل الخاص بنظرية المعلومات والفن مطمئنا اياي بشأنه ومقترحاً بعض التغييرات ، وفي مجال علم النفس افدت من مشورة كل من ب . د . د . بريكر ، ه . م . جينكنز ، و . ن . شيبارد ، وان كانت الآراء المثبتة في النهاية غير صادرة عنهم . لقد كانت مساعدة م . ف . مانيوز كبيرة ، بينما قدم بينوت مانديروت الدعم في كتابة الفصل الثاني عشر ، وقام بقراءة المخطوطة ج . ب . رانيون ، وكشف عن الاخطاء الانشائية إريك وولمان مزوداً ما يلزم من التوجيه . كما انني ادين للبروفسور مارتن هارويت الذي اقنعني واقنع دار نشر دوفر بضرورة إعادة طبع الكتاب . ويدين القارئ بدوره لجيمس . ر . نيومان لتحقيقه إيراد خلاصات في نهايات الفصول ، ولمحاولاتي اخيراً تبسيط بعض النقاط وجعلها اسهل . انني ادين لكل هؤلاء ، ولا ادين باقل للآنسة ف . م . كوستلو التي استطاعت ان تعيد النظام الى فوضى المخطوطة حيث اعدتها واصلحتها باشكالها . اما بخصوص هذه الطبعة الجديدة فادين بالكثير لسكرتيرتي السيدة باتريشيا . ج . نيل .

ايلول ١٩٧٩

ج . د . بيرس

## الفصل الأول

### العالم والنظريات

نشر كلود . اي . شانون عام ١٩٤٨ بحثاً بعنوان ( نظرية رياضية للاتصالات ) وتحول البحث إلى كتاب عام ١٩٤٩ . أما قبل ذلك التاريخ فقد اقتصر الأمر على بعض البحاثة المتفرقين يحققون بعض الانجازات المنعزلة في نظرية الاتصالات بين الفينة والأخرى . والآن وبعد حوالي ثلاثين سنة ، أصبحت نظرية الاتصالات ، أو كما تدعى في بعض الأحيان نظرية المعلومات ، مجالاً للبحث معترفاً به . لقد نشر العديد من الكتب حول نظرية الاتصالات وعقدت حولها الندوات والمؤتمرات الدولية .

عُيّن معهد المهندسين الكهربائيين والإلكترونيين مجموعة عمل متخصصة في نظرية المعلومات تنشر دراستها بشكل دوري ستة مرات في السنة . كما تنقل مجلات أخرى مقالات متفرقة عن نظرية المعلومات .

نحن جميعاً نستخدم كلمتي الاتصالات والمعلومات ، ومن غير المحتمل أن نقلل من أهميتها . لقد عقب فيلسوف معاصر هو آ. ج. آير على الأهمية القصوى والمعنى الواسع للاتصالات في حياتنا ، فوق رأيه ، لا نقصر مبادلاتنا على المعلومات فقط ، بل نتعداها إلى المعرفة ، الخطأ ، الآراء ، الأفكار ، الخبرات ، الآمال ، الأوامر ، الانفعالات ، العواطف والطباع . إن الحرارة والحركة كليهما يمكن نقلهما ، وكذا القوة ، الضعف والمرض . وينسوه الفيلسوف بأمثلة وتعليقات أخرى عن التظاهرات العريضة والمفزة للاتصال في عالم الإنسان .

وهكذا فالاتصالات بالغة الأهمية ومتنوعة ، ولذا تبرز أهمية نظرية عامة عن الاتصالات ، نظرية متماسكة ومفيدة . أما إذا أضفنا الى كلمة « نظرية » كلمة « رياضية » بكل ما تنطوي عليه من سحر وصرامة ، اذن لاستحالت مقاومة الإغراء ولو تعلمنا بعض العلاقات لحللنا كل مشاكلنا في الاتصالات ولاصبحنا سادة المعلومات عوضاً عن أن نكون عبيد المعلومات الخاطئة .

ولكن للأسف ليس هذا هو مسار العلم ، ف منذ ٢٣٠٠ سنة تناول فيلسوف آخر هو أرسطو في بحثه عن الفيزياء مفهوماً عاماً للاتصالات هو مفهوم الحركة .

عرف أرسطو الحركة بأنها تحقيق ما هو كامن اذا كان موجوداً فعلاً بشكل كامن ، وضمن في مفهوم الحركة الزيادة والنقص لكل ما يمكن ان يزيد او ينقص ، وأن يقترب او يبتعد ، وأخيراً ما يمكن بناؤه . تحدث أرسطو عن ثلاثة أصناف من الحركة وذلك وفق شدتها ، تأثيرها ، ومكانها . لقد وجد فعلاً ، كما قال ، أنواعاً عديدة من الحركة تساوي مجموعها عدد الممانى المختلفة لكلمة : يكون .

نواجه الحركة هنا بكل تعقيداتها الجلية ، تلك التعقيدات التي تبدو مربكة لنا فعلاً ، لأن ارتباط الكلمات ببعضها يختلف من لغة لأخرى ، وعلى كل حال لن نعني بالحركة كل التغييرات التي تحدث عنها أرسطو بالضرورة .

لكم كان أمر الحركة هذه محيراً لاتباع أرسطو ! لقد بقي الأمر كذلك حتى جاء نيوتن الذي عبر عن الحركة في قوانين علمية محكمة لا يزال المهندسون يستعملونها حتى اليوم في تصميم وبناء الآلات كما يطبقها الفلكيون في دراسة حركات الكواكب والنجوم والتوابع الصناعية . وقد وجد الفيزيائيون بعد ذلك أن قوانين نيوتن ليس إلا حالات خاصة من قوانين أشمل ، وأن قوانين نيوتن هذه صحيحة اذا كانت السرعة المدروسة صغيرة بالمقارنة مع سرعة الضوء واذا كان مجال تطبيق الظاهرة



كبيراً بالقلونة مع الذرة ، وعلى الرغم من ذلك تشكل قوانين نيوتن جزءاً حياً وفعالاً من هملتنا الفيزيائي المعاصر ، اذ لم يضعها التطور المعاصر في المتاحف . واذا كانت الحركة جزءاً هاماً من عالمنا، وجب علينا استعراض قوانين نيوتن فيما يلي :

١ - يبقى أي جسم على حالته من السكون أو الحركة المنتظمة ما لم تؤثر عليه قوة ما .

٢ - يكون التغير في سرعة الجسم في اتجاه القوة المؤثرة عليه ، اما مقدار التغير فيتناسب طردياً مع القوة المؤثرة ومع الزمن الذي جرى خلاله التأثير ، وأخيراً يتناسب مقدار التغير عكساً مع كتلة الجسم .

٣ - عندما يؤثر جسم ما بقوة على جسم آخر ، فان الجسم الآخر بدوره يؤثر على الاول بقوة تماكس القوة الاولى بالاتجاه وتساويها بالشدة .

يضاف الى قوانين نيوتن هذه ، قانون الجاذبية العام :

٤ - تتجاذب اية ذرتين من المادة بقوة محمولة على المستقيم الواصل بينهما ، وتتناسب شدتها طردياً مع كتلتي الذرتين وعكساً مع مربع المسافة الفاصلة بينهما .

لقد احدثت قوانين نيوتن ثورة علمية وفلسفية ، فبواسطتها اختزل الابلانس المجموعة الشمسية الى آلة مفهومة ، وهي التي شكلت القاعدة الاساسية للطيران والصواريخ . وكذلك علم الفلك ، وعلى الرغم من ذلك بقيت قاصرة عن الاجابة على اسئلة تتعلق بالحركة طرحها ارسطو . فقد حلت قوانين نيوتن مشاكل الحركة كما عرفها نيوتن وليس كما استخدم الكلمة قديماء اليونانيين في القرن الرابع قبل الميلاد أو ما تنطوي عليه من معاني في لغات القرن العشرين .

تستجيب اللغات المستخدمة لحاجتنا اليومية ، او لربما تمت

صياغتها استجابة الحاجات أجدادنا . اننا لا نستطيع استخدام كلمة منفصلة لكل شيء أو موضوع اذ لو فعلنا ذلك لقبعنا نخترع الكلمات الى الأبد ، وبهذا يصبح الاتصال مستحيلا . واذا رغبنا بامتلاك لفة على الإطلاق فعلينا أن نستخدم كلمة واحدة للدلالة على أشياء أو حوادث عديدة . وهكذا فمن الطبيعي أن نقول أن الرجال والجياد تراكض ( على الرغم من أننا نفضل أن نقول أن الجياد تعدو ) ، وكذلك نجد من الملائم أن نقول أن محرك السيارة يتحرك وأن السيولة المالية في المصرف تتحرك .

تتعلق واحدة هذه المفاهيم بلغاتنا الانسانية والتبدو بعيدة من أي معائل فيزيائي يمكن للعلم أن يتناوله بسهولة وبدقة . فمن الجنون أن نبحث عن نظرية علمية بسيطة ومتسقة تغطي جريان الماء في الانابيب وجري العدائين في حلبة السباق . ولعله جنون آخر أن نبحث عن نظرية عامة تغطي كل الحركات التي تحدث عنها أرسطو أو كل أنواع الاتصالات والمعلومات التي اكتشفها الفلاسفة فيما بعد .

نستخدم في لغتنا اليومية الكلمات بشكل يلائم أعمالنا اليومية . لا يسعى العلم لدراسة الكلمات وعلاقتها إلا في مجال دراسة اللغة بحد ذاتها ولكنه يبحث بالمقابل في ظواهر الطبيعة ، بما فيها طبيعتنا الانسانية ونشاطاتنا ، ويحاول تجميعها في زمر قابلة للفهم . ينطوي هذا الفهم على قابلية تمييز القواسم المشتركة بين الحوادث المتباعدة ( مثلا حركة الكواكب في السماء وحركة المتزلج على الجليد ) وكذلك على وصف سلوك الظواهر بدقة وبساطة .

تنتمي المصطلحات العلمية الى قلموس كلماتنا اليومية . لقد استخدم نيوتن كلمات : القوة ، الكتلة ، السرعة ، والجاذبية . وعندما تستخدم الكلمات لأغراض علمية تعطى عادة معنى خاصا ، وفي بعض الأحيان معنى جديدا . اننا لا نستطيع التحدث بلغة نيوتن من قوة الظروف أو كتلة الجماهير ، وأخيرا عن جاذبية بريجيت باردو ، وبالمثل علينا أن نتوقع أن نظرية الاتصالات لن يكون بمقدورها الإجابة وبشكل معقول عن كل سؤال نصوغه متضمنا كلمة الاتصالات أو المعلومات .

لا تقدم النظرية العلمية الصحيحة إلا نادراً ، ان قدمت على الإطلاق ،  
الحلول المرجوة للمشاكل الملحة التي نطرحها بشكل متكرر ، انها لا تعطي  
الاجوبة عن تساؤلاتنا إلا في حالات قليلة ، وهكذا فعوضاً عن عقلنة  
افكارنا ، تقوم تلك النظرية بنبلها ، او تتركها في احسن الاحوال كما  
هي . تطلعنا النظرية الصحيحة وبشكل متجدد على جوانب خبراتنا  
التي يمكن فهمها ببساطة وربطها ببعضها بشكل فعال . سنسعى في هذا  
الكتاب وراء الافكار المتعلقة بالاتصالات والتي يكمن ربطها وفهمها على  
ذلك النحو .

كيف نستطيع الحصول على نظرية تتعلق بمواضيع خبراتنا ، يتحقق  
لنا ذلك عندما نتمكن من عزل اجزاء من خبراتنا قابلة للربط ببعضها تم  
نقوم بتشريحها وفهمها وتوحيدها . تشكل قوانين نيوتن جزءاً هاماً من  
الفيزياء النظرية ندعوه الميكانيك ، وهي لا تغطي النظرية بأكملها بل هي  
في واقع الامر قاعدة لها ، كفرضيات الهندسة بالنسبة لجسم الهندسة  
ككل . تضم النظرية الفرضيات نفسها الى جانب كل التفاصيل الرياضية  
والاستنتاجات المنطقية التي تترتب بشكل ملزم على الفرضيات . يتوجب  
على هذه النتائج أن تتناغم مع ظواهر العالم المعقدة حولنا كي تتحقق  
صحة النظرية . ان النظرية غير الصحيحة عديمة الفائدة .

تقرر فرضيات وافكار النظرية بشمولها ، أي مدى الظواهر التي  
تغطيها . وهكذا فقوانين نيوتن للحركة والجاذبية عامة جداً ، فهي تفسر  
حركة الكواكب وخصائص النوااس الضابط للوقت ومميزات كل انواع  
الات والآليات . إلا أن هذه القوانين تعجز عن تفسير امواج الراديو .

اعلن جيمس كلارك ماكسويل عام ١٨٧٣ من خلال كتابه : الكهربائية  
والمغناطيسية ولأول مرة القوانين الطبيعية التي تربط الحقل الكهربائي  
والحقل المغناطيسي والتيار الكهربائي ، وبين وجود امواج كهروطيسية  
( امواج راديو ) ترتحل بسرعة الضوء . اثبت هرتز ذلك فيما بعد بشكل  
تجريبي ونعلم اليوم أن الضوء هو امواج كهروطيسية . تمثل معادلات  
ماكسويل التعبير الرياضي عن نظريته في الكهربائية والمغناطيسية وهي

الأساس المتين لكل الأبحاث الكهربائية . تؤكد أن معادلات ماكسويل تحمل طبيعة عامة جداً ، فهي تفسر كل الظواهر الكهربائية غير الكوانتية . يتناول فرع من النظرية الكهربائية ، يدعى بنظرية الشبكات ، كل الخصائص الكهربائية للدوائر الكهربائية أو الشبكات والتي يمكن الحصول عليها بربط ثلاثة أنواع من العناصر الكهربائية النموذجية : المقاومات ( وهي أجهزة مثل ملفات من أسلاك رفيعة قليلة الناقلية أو رقائق من المعدن أو الفحم تعيق مرور التيار ) والمحرضات ( وشائع من أسلاك نحاسية تلف أحياناً على نوى مغناطيسية ) والمكثفات ( صفائح رقيقة من المعدن تفصلها مادة عازلة كالميكافا والبلاستيك ، وكانت قارورة لايدن المثال المبكر للمكثفة ) . يقول الفيزيائي إن نظرية الشبكات أقل عمومية من معادلات ماكسويل ، لأن الأولى تتناول الخصائص الكهربائية لبنى فيزيائية خاصة نموذجية ، بينما تتناول معادلات ماكسويل الخصائص الكهربائية لأي جملة فيزيائية بما في ذلك تلك البنى الفيزيائية الخاصة والنموذجية وأيضاً أمواج الراديو التي تقع خارج دائرة نظرية الشبكات .

وهكذا ، فإن النظرية الأكثر عمومية والتي تفسر أكبر قطاع من الظواهر هي النظرية الأقوى والاميز ويمكن تخصيصها على الدوام بهدف الانتقال إلى الحالات الأبسط . وهذا ما دعى الفيزيائيين للبحث عن نظرية المجال الموحد التي تضم قوانين الميكانيك والجاذبية والكهرطيسية . يبدو جلياً أنه يمكن ترتيب كل النظريات في تسلسل وفق عموميتها . وإذا كان الأمر كذلك فمما هو موقع نظرية الاتصالات في مثل هذا التسلسل .

إن الحياة ليست لسوء الحظ على هذه الدرجة من البساطة ، فمن وجهة النظر المطروحة تبدو نظرية الشبكات أقل عمومية من معادلات ماكسويل ، ومن وجهة نظر أخرى هي أكثر عمومية ، ذلك لأن كل النتائج الرياضية المترتبة عليها ممكنة التطبيق في كل الجمل المتميزة المبنية من مركبات ميكانيكية كما هي مطبقة في دراسة وصلات العناصر الكهربائية النموذجية . نجد بناء على ذلك المقابلات التالية : النابض في الميكانيك

يقابل المكثفة في الكهرباء ، والكتلة تقابل المحرض ، بينما المخمدات ، كتلك التي تراكب على الأبواب لمنع انصفاقها تقابل المقاومة . كان من الممكن في واقع الامر تطوير نظرية الشبكات لدراسة الجمل الميكانيكية ، وهي تستخدم فعلا في دراسة الصوتيات . اما لماذا نشأت نظرية الشبكات من دراسة العناصر الكهربائية النموذجية ولم تنبثق عن دراسة الجمل الميكانيكية ، فالاجابة عن ذلك تكمن في السياق التاريخي وليس بالضرورة الملزمة .

نقول ان نظرية الشبكات هي بمعنى ما اكثر عمومية من معادلات ماكسويل ، فالأخيرة لا يمكن تطبيقها على الجمل الميكانيكية ، بينما الأولى تغطي قطاعا من الجمل الميكانيكية النموذجية والخاصة وقطعا مناظرا من الجمل الكهربائية النموذجية والخاصة . إلا أنه ومن جانب آخر تبدو معادلات ماكسويل أكثر عمومية من نظرية الشبكات فهي تنطبق على كل الجمل الكهربائية وليس فقط على صنف من الدارات الكهربائية النموذجية الخاصة .

يتوجب علينا الى حد ما قبول هذا الامر ببساطة دون أن يكون بمقدورنا شرح الحقيقة بشكل كامل ، ولكن يمكن أن نقول أن هذا كثير . ان بعض النظريات هي نظريات فيزيائية كقوانين نيوتن ومعادلات ماكسويل ، حيث تتناول الأولى الظواهر الميكانيكية بينما تعنى الثانية بالظواهر الكهرومغناطيسية . اما نظرية الشبكات فهي بالضرورة نظرية رياضية ، وبذا يمكن أن تمثل رموزها معاني فيزيائية متباينة تتناول الظواهر الميكانيكية مثلما تتناول الاهتزازات الكهربائية .

تمثل النظرية الرياضية في اغلب الاحيان نظرية أو جملة نظريات فيزيائية ، إذ يمكنها أن تكون الصياغة الرياضية المتسقة والتي تهدف معالجة جوانب محددة من نظرية فيزيائية عامة . تندرج نظرية الشبكات في هذا الاطار فهي في واقع الامر الجهاز الرياضي اللازم لدراسة مسلك فيزيائي معين مشترك بين الجمل الميكانيكية والكهربائية ، في حين يعالج فرع من الرياضيات يعرف باسم نظرية الكمون مشاكل مشتركة بين

الحقول الكهربائية والمغناطيسية والجاذبية وإلى حد ما علم الديناميكا الهوائية . تبدو بعض النظريات ، على كل حال ومن النظرة الأولى رياضية أكثر منها فيزيائية .

نستخدم الكثير من هذه النظريات الرياضية في تعاملنا مع العالم الفيزيائي . والحساب واحد من هذه النظريات . فإذا أشرنا ( لعنصر من مجموعة ) من التفاح ، أو الكلاب أو الرجال بالرمز ١ ، ولعنصر آخر بالرمز ٢ ، وهكذا ..... ، وإذا استنفدنا بهذه العملية كل الأعداد الطبيعية حتى العدد ١٦ ومتضمناً إياه ، فإننا نشعر بثقة كاملة أنه يمكننا تقسيم المجموعة إلى مجموعتين جزئيتين تحتوي كل منهما على ٨ عناصر (  $16 \div 2 = 8$  ) وأن العناصر يمكن ترتيبها في مربع مقسوم إلى صفوف من المربعات الصغيرة يحتوي كل منها على أربعة مربعات ( لأن  $16$  هو مربع كامل :  $16 = 4 \times 4$  ) . وإذا حلولنا أكثر من ذلك رصف التفاحات أو الكلاب أو الرجال بكل الأشكال الممكنة لحصلنا على جملة من المتسلسلات المتباينة يبلغ عددها  $2092278988800$  متسلسلة وهذا العدد يقابل عدد الامكانات التي نستطيع وفقها كتابة الأعداد من ١ إلى ١٦ بأوضاع مختلفة من حيث جوارها لبعضها . أما إذا استنفدنا في عمليتنا كل الأعداد الطبيعية حتى العدد ١٣ فقط ومتضمناً إياه ، كنا على ثقة كاملة بأن المجموعة يستحيل تقسيمها إلى مجموعات جزئية متساوية لأن العدد ١٣ هو عدد أولي ولا يمكن التعبير عنه كجداء لأعداد أخرى .

لا يعتمد كل ما تناولناه على طبيعة الأشياء موضوع البحث . فإذا ربطنا عناصر مجموعة ما من الأشياء مهما اختلفت طبيعتها بالأعداد الطبيعية ، لما تغيرت النتائج التي نحصل عليها إذا طبقنا عمليات الجمع ، أو الطرح ، أو الضرب ، أو القسمة ، أو حتى إذا رصفنا الأعداد بأوضاع مختلفة . تبدو العلاقة بين الأعداد ومجموعات الأشياء طبيعية جداً للدرجة أننا نستطيع تجاوز حقيقة أن الحساب إن هو إلا نظرية رياضية يمكن تطبيقها على الظواهر الطبيعية في حدود التقابل الممكن بين خصائص الأعداد وظواهر العالم الفيزيائي .

يطلعنا الفيزيائيون على حقيقة هامة مفادها أنه يمكننا الحديث عن مجموع الجسيمات الأولية المنتمة لزمرة معينة ، كالإلكترونات مثلاً ، إلا أنه يستحيل أن تربط الأعداد بشكل مفصل لعناصر تلك الزمرة إذ أن الجسيمات الأولية من نفس النوع لا يمكن تمييز أفرادها بعضها عن بعض ، وهكذا يستحيل أن نتحدث عن رصف الأفراد من نوع واحد من الجسيمات الأولية وبأشكال مختلفة كما فعلنا في حالة الأعداد . يترتب على ذلك نتائج هامة في فرع من الفيزياء يدعى بالفيزياء الإحصائية . وعلينا أن نلاحظ أيضاً أنه في حين أن الهندسة الإقليدية هي نظرية رياضية تخدم المساحين والملاحين وبشكل فعال في مشاكلهم العملية ، فإننا نعتقد بشكل جازم أن هذه الهندسة غير دقيقة بما يكفي لتوصيف الظواهر الفلكية .

كيف يمكن أن نصنف النظريات ؟ نستطيع الحديث عن نظرية معينة على أنها ضيقة للغاية أو شديدة العمومية في مجال تطبيقها . يمكننا كذلك تمييز النظريات بكونها فيزيائية أو رياضية ، فالنظرية الفيزيائية هي تلك التي تصف وبشكل كامل مجالا معيناً من الظواهر الفيزيائية ، وهي ظواهر محدودة على الدوام من الناحية العملية . تصبح النظرية أكثر تجريداً ورياضية عندما تتناول صفات منمذجاً من الظواهر أو بعض جوانب الظواهر .

تعد قوانين نيوتن نظريات فيزيائية لأنها تقدم وصفاً كاملاً للظواهر الميكانيكية كحركات الكواكب أو اهتزازات النواس ، أما نظرية الشبكات فهي أقرب إلى مجال الرياضيات أو التجريد ذلك لأنها تصلح لمعالجة أنواع مختلفة من الظواهر الفيزيائية النموذجية . يعد علم الحساب رياضياً وبالغ التجريد ، أنه يغطي أنواعاً عديدة من العناصر الفيزيائية ، إلى جانب إمكانية استخدامه لعد الكلاب ولعد الرجال وكذلك لعد الإلكترونات ( لتتذكر أن الإلكترونات غير قابلة للتمييز بين بعضها ) . وأخيراً يصلح علم الحساب لرصد عدد الأيام الماضية .

تندرج نظرية الاتصالات وفق هذه الأطر في عداد النظريات الرياضية

الشديدة العمومية ، وعلى الرغم من انها انبثقت أصلاً من دراسة الاتصالات الكهربائية ، فهي تتناول القضايا بأسلوب مجرد وطريقة معممة . وهي تقدم في واحدة البيت ( Bit ) مقياساً شاملاً للكم المعلوماتي بدلالة الاختيار أو الريبة . تنطوي واحدة البيت المعلوماتية على تحديد أو معرفة الخيار بين بدلين متساويي الاحتمال كرقمين أو رسالتين قيد الإرسال . تطلعتنا نظرية الاتصالات على عدد واحدات البيت المعلوماتية التي يمكن إرسالها في كل ثانية عبر اقنية اتصال نموذجية أو غير كاملة وذلك بدلالة التوصيف المجرد لخصائص هذه الاقنية . تعلمنا نظرية الاتصالات كيفية قياس السرعة التي يولد وفقها مصدر مرسل ( كذبايع أو كاتبة ) المعلومات المختلفة ، وتعلمنا هذه النظرية أيضا كيف نرسم أو نمثل الرسائل من مصدر مرسل بكفاءة تسمح ببثها عبر قناة من نوع خاص كدائرة كهربائية . وكذلك تلفت نظرتنا الى طرائق تحاشي الأخطاء في الإرسال .

يبدو أحيانا استخدام الفهم الذي توفره لنا نظرية الاتصالات في مجال مسألة خاصة عملية أمراً صعباً ، ذلك لأن هذه النظرية تعرض لمختلف القضايا في عبارات عامة ومجردة ومع ذلك فكون نظرية الاتصالات ذات طابع مجرد ورياضي عام يجعل مجال تطبيقاتها واسعاً . ولنظرية الاتصالات فوائد جمة فيما يتعلق باللغة المنطوقة والمكتوبة ، وكذلك في الإرسال الميكانيكي للرسائل وفي دراسة خصائص الآلات وربما في السلوك البشري أيضا . ويعتقد البعض أن لهذه النظرية دوراً كبيراً في الفيزياء على نحو سننتطرق اليه فيما بعد في هذا الكتاب .

ومهما يكن من أمر ، فنظرية الاتصالات هي ، بشكل مبدئي ، كما وصفها شانون ، النظرية الرياضية للاتصالات ، اذ تصاغ فيها المفاهيم بعبارات رياضية يمكن أن ترتبط بها أمثلة فيزيائية متنوعة . وعلى الرغم من قابلية استخدامها من قبل المهندسين وعلماء النفس والفيزيائيين ، تبقى نظرية الاتصالات نظرية رياضية أكثر منها نظرية فيزيائية أو نفسية أو فناً هندسياً .



ليس من السهل تقديم نظرية رياضية لعامة الناس ، ونظرية الاتصالات نظرية رياضية ، وبذا فالادعاء بإمكانية شرحها دون اللجوء للرياضيات هو أمر ( قد يدعو للسخرية ) . وهكذا سيدهش القارئ عندما يواجه العلاقات والمعادلات في هذه الصفحات : انها تعرض الأفكار التي يرد وصفها بكلمات لقد ضمنت الكتاب ملحقاً رياضياً لمساعدة القارئ غير الرياضي اذا هو رغب بقراءة المعادلات بشكل سليم .

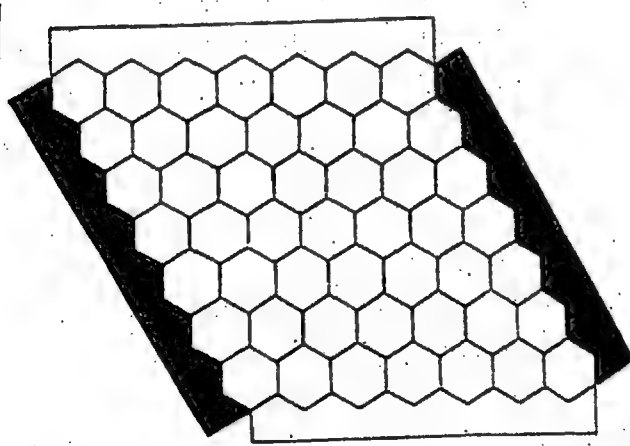
انني على دراية ، في جميع الاحوال ، بما تجلبه صور غير محببة للضرب وللتقسيم وربما للجدور التريبية ، وايضا المعاناة المضنية في الصفوف الثانوية : ان مظهر الرياضيات هنا مظهر مضلل اذ انه يركز في المقام الاول على مصطلحات خاصة وحيل عملية ويضع جانباً وجه الرياضيات الاهم بالنسبة للرياضيين وربما كان القارئ قد واجه النظريات والبراهين في الهندسة او لعله لم يواجهها اطلاقاً ، ورغم ذلك تبقى النظريات والبراهين ذات أهمية قصوى في الرياضيات البحتة والتطبيقية . تلخص النتائج الهامة النظريات المعلومات في شكل نظريات رياضية وهي نظريات لانه يمكن ببساطة البرهان على انها عبارات صحيحة .

ينطلق الرياضيون من فرضيات وتعريف محددة ، ثم يبرهنون صحة نظريات او قضايا محددة باستخدام براهين وحجج رياضية . كان هذا ما أنجزه شانون في كتابه : نظرية رياضية للاتصالات . تتوقف صحة النظريات على صحة الفرضيات الموضوعية والبراهين المستخدمة لإثباتها .

نعم ان كل ما قدمناه هو التجريد ، ولعل انجع وسيلة لايضاح معنى النظرية ومعنى البرهان هي سوق الامثلة . والن استطيع فعل ذلك بمطالبة القارئ غير المتخصص ان يتفهم النظريات الصعبة للاتصالات الواحدة تلو الأخرى ، اذ يتطلب هذا الأمر ، في الواقع ، تركيزاً كبيراً كما يستغرق وقتاً لا بأس به حتى من قبل من كانت لديه خلفية معينة من الرياضيات . وخير ما نفعله ان نصل الى محتوى ومعنى وأهمية النظريات .

أقترح في هذا السياق اللجوء إلى أمثلة من نظريات رياضية بسيطة وبراهينها . يتعلق المثال الأول بلعبة اسمها التعويذة ، أما النظرية المراد برهانها فتتضمن على أن اللاعب الذي سيفتح اللعبة هو الفائز دون شك .

تجري اللعبة على رقعة تتكون من ( ٤٩٠ ) مسدساً منتظماً كما يتضح في الشكل ١ - ١ ، حيث يمكن وضع علامات عليها يستخدم اللاعب الأول علامات سودا يحاول توضعها لتكوين مسار مستمر وإن كان متعرجاً بين المساحتين السوداوين على يمين الرقعة ويسارها ، بينما يستخدم اللاعب الثاني علامات بيضاء يحاول توضعها بدوره لتكوين مسار مستمر وإن كان متعرجاً بين المساحة البيضاء في أعلى الرقعة والمساحة البيضاء في أسفلها ، يلعب الخصمان بشكل متبادل ، حيث يضع اللاعب علامة واحدة خلال كل لعبة . طبعاً سيفتح اللعبة أحد اللاعبين .



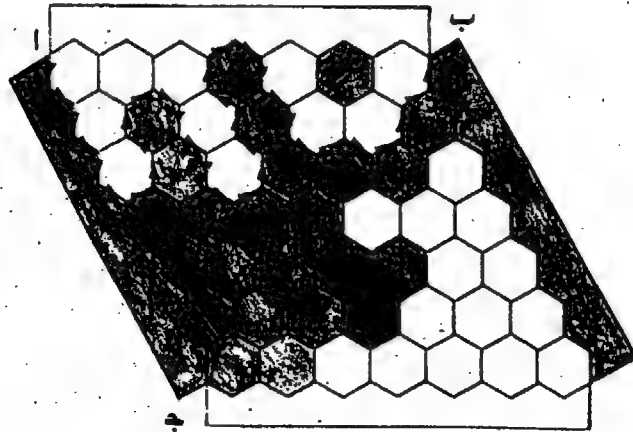
الشكل ١ - ١

لكي نستطيع أن نبرهن على أن من سيفتح اللعبة هو المنتصر ، يلزم أولاً أن نبرهن على أنه في ختام اللعبة ، أي بعد امتلاء كل خانة إما بعلامة سوداء أو بعلامة بيضاء لا بد أن يكون أحد اللاعبين قد انتصر .

النظرية : ١ : ستنتهي اللعبة بفوز اللاعب الاول او اللاعب الثاني .

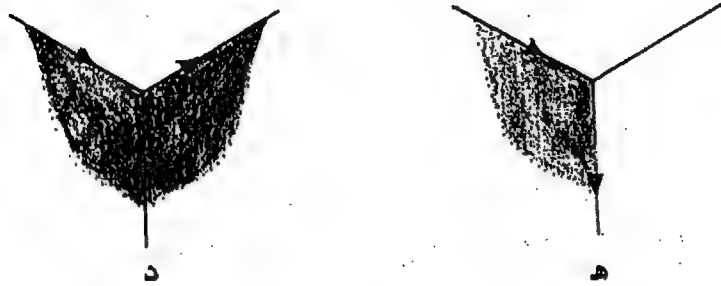
توضيح : يحدث في بعض انواع اللعب ان مباراة معينة قد تنتهي بعدم فوز أي من المتبارين ، كالشطرنج مثلا حيث تنتهي اللعبة بالانسحاب ، بينما في لعبة ( الطرة او النقش ) سيفوز احد اللاعبين على الدوام . وهكذا ، فلكي نبرهن هذه النظرية علينا ان نبرهن انه بتحقيق امتلاء كل خانة بعلامة بيضاء او علامة سوداء فسنحصل اما على مسار اسود بين المساحتين السوداوين يعترض أي مسار ابيض بين المساحات البيضاء او سنحصل على مسار ابيض بين المساحات البيضاء يعترض أي مسار اسود بين المساحات السوداء . بكلمة مختصرة سيفوز الابيض او الاسود .

البرهان : نفترض ان كل خانة سدسة قد جرى املؤها بالابيض او الاسود . لنبدأ من الزاوية اليسرى العلوية للحدود البيضاء ، أي النقطة ٢ - ١ - من الشكل ١ - ٢ ونتابع الحدود بين المسدسات البيضاء والسوداء سنتحرك على الدوام على ضلع من سدس ما بحيث يقع اللون



الشكل ١ - ٢

الأسود على يمين السائر واللون الأبيض على يسار السائر ، ان الحدود المتابعة بهذا الشكل ستتمطف عند الرؤوس المتتالية للمسدسات اذ سنواجه عند على رأس احدى حالتين متباينتين فلما ان يكون هناك مسدسان اسودان متماسان على يمين السائر ومسدس ابيض على يساره كما في الشكل ١ - ٣ - د ، او ان يكون هناك مسدسان ابيضان متماسان على يسار السائر ومسدس اسود على يمينه كما في الشكل ١ - ٣ - هـ



الشكل ١ - ٣

نلاحظ انه في كلتا الحالتين سيتحقق وجود مسار اسود مستمر على يمين الحدود ومسار ابيض على يسارها . لنلاحظ ايضا ان الحدود لا تتقاطع ولا تندمج مع ذاتها سواء في الشكل ١ - ٣ - د او الشكل ١ - ٣ - هـ ذلك لان مساراً وحيداً عبر كل رأس سيحقق وقوع الابيض على يمينه والابيض على يساره . سنكتشف ببساطة ان هاتين الحقيقتين صحيحتان للحدود بين المسدسات السوداء والبيضاء وكذلك بينها وبين حدود الرقعة وهكذا فعلى الطرف الايسر سيقع مسار من المسدسات السوداء حتى الحافة السوداء اليسرى . ولما كان خط الحدود غير قابل للتقاطع مع ذاته فلا يمكنه الالتفاف على نفسه كحلقة مفرغة بل لا بد من ان يصل اتفاقاً الى حافة سوداء او الى حافة بيضاء . واذا وصل خط الحدود الى حافة بيضاء او الى حافة سوداء بوجود اللون الاسود على يمينه واللون

الابيض على يساره كما شرحنا، فمن أي مكان باستثناء ب و ج يمكن ان نمد خط الحدود بوجود الاسود الى يمينه والابيض الى يساره وعندها يمكن لهذا الخط ان يصل الى احدى النقطتين ب او ج فاذا وصل الى النقطة - ب - من الشكل ١ - ٢ فان المسدسات السوداء التي تقع على يمينه وهي المسدسات المتصلة بالحافة السوداء اليسرى ستكون متصلة ايضا بالحافة السوداء اليمنى، بينما ستتصل المسدسات البيضاء على يساره بالحافة البيضاء العلوية فقط وسيتحقق عندها فوز الاسود تبدو واضحة في هذه الحالة استحالة فوز الابيض في حالة فوز الاسود اذ ان الشريط المستمر من الخلايا السوداء المتجاورة والممتدة من الحافة اليسرى الى الحافة اليمنى سيحول دون تشكيل شريط مستمر من الخلايا البيضاء حتى الحافة السفلى وبمحاكمة مماثلة نجو ان وصول خط الحدود حتى النقطة ج يعني فوز الابيض .

النظرية : ٢ : يمكن للاعب الذي سيفتح اللعبة ان يحقق الفوز .

توضيح : نعني بالامكانية هنا وجود طريقة للفوز يتوجب على اللاعب ان يكتشفها . تنطوي طريقة الفوز على لعبة اولى معينة ( يمكن ان يكون هناك حركات اولى غيرها ولكنها ليست ضرورية اضافة لخطه او وصفه تحدد اللعبة الصحيحة التالية كرد على اية لعبة قد ينفذها الخصم في المراحل اللاحقة من المباراة ، اي اذ نفذ لاعبا المعبر عند كل دور من ادوار اللعبة المرسومة بشكل مسبق ، عندها سيتحقق الفوز بصرف النظر عن ردود خصمه .

البرهان : اما ان تكون هناك طريقة ما للعب اذا اتبعها اللاعب المعبر فسيحقق الفوز بشكل اكيد ، او انه مهما حاول من امكانات مختلفة للعباته ، فان اللاعب الآخر سيتمكن من اختيار بعض الالعبات التي ستمنعه من تحقيق الفوز ، وهكذا سيتمكن اللاعب الآخر من الفوز . نفترض ان اللاعب الآخر يمتلك وصفا اكيدة للفوز . ونذكر هنا ان اللاعب المعبر هو الذي سيفتح المباراة وان الآخر سيكون التالي بعد الافتتاح بالنسبة

للعبة الاولى . نفرض ان اللاعب المعتبر قد افتتح المباراة باي لعبة وان الآخر قد استجاب بلعبة مقابلة ، وبعد ذلك لجأ اللاعب المعتبر الى تطبيق وصفة الفوز الاكيد التي يعرفها اللاعب الآخر أيضا ، واذا دعت الحاجة تطبيق هذه الوصفة عند اي لعبة الى تغطية سدس كان قد غطاه للتو ، فسيفضي في هذه الحالة اي سدس آخر غير مشغول . وهكذا ستمتلئ كل خانات الرقعة المدرجة في وصفة الفوز الاكيد . ان حقيقة كون لاعبنا المعتبر قد افتتح المباراة تعطيه امتياز اشغال خانة اضافية من الرقعة وهذا يحول دون خصمه وتغطية خانة محددة ، في حين ان مثل هذه الاستحالة لا تنطبق على اللاعب المعتبر . وهكذا يمكن للاعبنا المعتبر ان يشغل كل الخانات الواردة في وصفة الفوز الاكيد وبالتالي يمكنه تحقيق الفوز . ان هذا يناقض فرضنا بإمكانية فوز اللاعب الآخر ، اي ان هذا الفرض بالتالي غير صحيح ، وعلى العكس فسيكون بإمكان اللاعب المعتبر ان يفوز .

يعتبر ارباب الرياضيات المجردة ان برهاننا هذا غير دقيق بما فيه الكفاية ، ولهذا البرهان ميزة عجيبة اخرى ، فهو ليس برهاناً انشائياً اي انه لا يبين الطريقة المفصلة التي يتوجب على لاعبنا المعتبر اتباعها لتحقيق الفوز . سنسرد للتو مثالا على برهان انشائي الطابع ، ولكن علينا اولاً ان نتحدث من المنظور الفلسفي عن طبيعة النظريات والحاجة لبراهينها .

تنطوي الصياغة الدقيقة للمشاكل العامة او المواضيع المدروسة على النظريات الرياضية . وهكذا فحقيقة ان صاحب حركة الافتتاح في لعبة التعويذة يمكنه الفوز هي ضرورة لازمة لتكوين اللعبة وقواعدها . ان نظريات الهندسة الاقليدية ضرورة ناجمة عن الفرضيات الموضوعة .

كان يمكننا ان نرى صحة النظريات مباشرة بقليل من التأمل وامعان الفكر . يذكر التاريخ في هذا السياق ان نيوتن الشاب قد وجد نظريات اقليدس واضحة بذاتها وانه كان يتألف من قراءة براهينها .

- 29 -

تقرن كل نقاط المربع مع نقاط مقابلة على المستقيم ، وهكذا فكل نقطة في المربع سيقابلها نقطة على المستقيم وكل نقطة على المستقيم سيقابلها نقطة في المربع . نقول اننا حققنا بذلك ارتساما للمربع على المستقيم وهو ارتسام من النوع المعروف بمصطلح الارتسام واحد - لواحد وذلك للسبب المبين في تعريفه .

نظرية : يمكننا تحقيق ارتسام واحد - لواحد من مربع تساوي مساحته الوحدة الى مستقيم يساوي طوله الوحدة ايضا .

توضيح : لقد بسطنا هذه النظرية واعتبرنا مربعا مساحته الوحدة ومستقيما طوله الوحدة، الا ان هذه التحديدات لاعلاقة لها بصحة النظرية من حيث الاساس .

البرهان : نعتبر الارقام المتتالية المكونة لارتفاع النقطة المعتبر في المربع ص ونكون منها عددا عشريا آخر بوضع هذه الارقام وعلى التوالي في المواقع الفردية بعد الفاصلة العشرية اي الموقع الاول والثالث والخامس وهكذا ، اما في المواقع الزوجية فنضع على لترتيب الارقام المكونة لبعء النقطة عن يسار المربع : س . نحصل بهذا التشكيل على عدد جديد س . نعتبر الآن النقطة من المستقيم التي تبعد عن يساره بالمقدار س ولتكن النقطة ب . ان النقطة ب هي مرتسم النقطة ب المعتبرة من المربع على المستقيم ، وهذا الارتسام هو واحد - لواحد ونبرهن على ذلك ببساطة اذ ان تغيير س او ص سيغير س الى عدد جديد معين ، بينما تغيير س سيغير بالمقابل كل من س ، ص . وهكذا فلكل نقطة من المربع معرفة ببعديها س ، ص يوجد نقطة واحدة من المستقيم معرفة ببعدها عليه س والعكس بالعكس . وهذا هو كل متطلبات ارتسام الواحد - لواحد . يتعرض هذا البرهان لبعض الصعوبات التي يمكن التغلب عليها بسهولة في حالة اعتبار بعض الاعداد الخاصة مثل  $\frac{1}{2}$  اذ يمكن كتابته على الشكل ٥ر٠ حيث يتبع العدد ٥ للانهاية من الاصفار او على الشكل ٤ر٠ ويتبع العدد ٤ بعدد لا نهاية له من مكرر العدد ٩ . ولو عدنا الى مثالنا عن النقطة المعينة داخل المربع لوجدنا ما يلي :



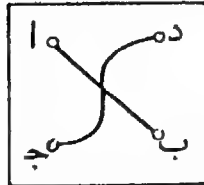
$\cdot 351427 \dots = s'$

- 51 -

مستقيم لا يمكن ان يكون مستمرا بحال من الاحوال . فعندما نتحرك بنعومة وبشكل مستمر على نقاط منحن داخل المربع ، تتحرك النقاط المقابلة على المستقيم بشكل عشوائي قافزة هنا وهناك ، ولا ينطبق ذلك على الارتسام الذي قدمناه للتو ، بل على اي ارتسام واحد - لواحد من المربع على المستقيم . نستنتج من ذلك ان اي ارتسام من المربع على المستقيم هو ارتسام غير مستمر .

نظرية : ان اي ارتسام واحد - لواحد من مربع على مستقيم هو ارتسام غير مستمر بالضرورة .

البرهان : نفرض ان الارتسام واحد - لواحد المعنى هو ارتسام مستمر . اذا كان هذا الامر صحيحا اذن لوجب ان ترسم النقاط من منحن = اختياري  $\alpha$  ب داخل المربع من الشكل ١ - ٥ على النقاط من المستقيم الواقعة بين المرسمين  $\alpha$  ،  $\beta$  . اما اذا لم يتحقق ذلك اذن لحدث اثناء حركتنا عبر المنحن في المربع ان نقفز من احد طرفي المستقيم الى الطرف الآخر ( ارتسام غير مستمر ) او نعبّر نفس النقطة من المستقيم مرتين ( ارتسام غير محقق للشرط الاساسي للارتسام المفترض : واحد - لواحد ) . نختار الآن نقطة  $\gamma$  الى يسار القطعة المستقيمة  $\alpha\beta$  ونقطة  $\delta$  الى يمينها ومن ثم نحدد النقاط المقابلة  $\gamma$  ،  $\delta$  داخل المربع .



الشكل ١ - ٥

نرسم المنحني الواصل بين ح ، د والقاطع للمنحني الواصل بين  $T$  ، ب . يتقاطع هذان المنحنيان في نقطة مرتسما على المستقيم يقع بين النقطتين  $T$  ، ب ، أما بقية النقاط من المنحني ح د فيجب ان ترسم على تقاطع تقع خارج القطعة المستقيمة  $T$  ب . وهذا خلاف فرضنا ان الارترسام مستمر . اذن فالارترسام غير مستمر وهو المطلوب .

سنجد فيما بعد أن لهاتين النظريتين أهمية خاصة في نظرية الاتصالات ، ونعني نظرية ارترسام نقاط المربع على نقاط المستقيم وفق ارترسام واحد - لواحد ونظرية كون هذا الارترسام غير مستمر . وهكذا استطعنا برهان نظريتين مفيدتين لنا فيما بعد بخلاف لعبة التعميدة .

ان الرياضيات هي طريقة الاكتشاف ، خطوة بخطوة ، لكل الحقائق المتضمنة في صياغة المسائل والتي لا تبدو واضحة للوهلة الاولى . يعني تطبيق الرياضيات أن يستشف المرء أولا الحقائق بشكل حدسي ثم يعمد الى اثباتها بالبرهان . نصل هنا الى عقدة إشكالية ، فالبراهين التي اقنعت قدماء الرياضيين أصبحت غير مرضية بالنسبة للرياضيين المحدثين .

لقد عبر رياضي معاصر مغمور ونزق ، كان قد راجع أبحاث شاتون في نظرية الاتصالات ، عن شكوكه فيما اذا كان المفزى الرياضي لهذه الابحاث جديراً بالاحترام . تبقى نظريات شاتون على الرغم من ذلك صحيحة وقد توفرت لها البراهين المقنعة لأكثر الرياضيين صلابة . ان البراهين التي قدمتها حتى الآن كبيان وعرض للرياضيات معرضة للنقد أكثر من غيرها من قبل دعاة الرياضيات البالغة التجريد .

لقد كان جل ما فعلته الإشارة الى طبيعة المحاكمات الرياضية اضافة لاعطاء فكرة من ماهية النظرية وطريقة برهانها . سننطلق ، وكل ذلك في جمعتنا الى النظرية الرياضية للاتصالات بكل نظرياتها والتي لن نعمد الى برهانها فعلا اضافة لبعض التضمينات والارتباطات التي تمتد وراء كل ما يمكننا برهانه بيقين رياضي .

تتناول نظرية الاتصالات كما اعطانا اياها شانون وكما سبق وقدمت في هذا الفصل مسائل هامة معينة للاتصالات والمعلومات ، ويتسم هذا التناول بكونه شاملاً ومجرداً ، الا ان هذه النظرية غير قابلة للتطبيق على كل ما يمكن صياغته باستخدام كلمتي الاتصالات والمعلومات بمعناها المتداول . تحيط نظرية الاتصالات بكل جوانب الاتصالات التي يمكن تنظيمها وتجميعها بشكل مفيد ومثمر ، تماماً كما تعالج قوانين نيوتن الحركات الميكانيكية فقط بأكثر مما تعنى بكل الظواهر المتباينة والمسماة والتي كانت في ذهن أرسطو عند استخدامه لكلمة الحركة .

يحاول العلم ، في سعيه الى النجاة ، التعامل مع الممكن . اننا لا نجد ما يدعونا للاعتقاد ان بإمكاننا توحيد كل الأشياء والمفاهيم التي نستخدم للدلالة عليها نفس الكلمة ، والاجدى ان نسمى الى جوانب الخبرة التي يمكن ربطها ببعضها ، واذا نجحنا في هذا الربط لاصبحنا امام نظرية . ان قوانين نيوتن هي نظرية يمكننا استخدامها في التعامل مع الظواهر الميكانيكية ، بينما معادلات ماكسويل هي نظرية تتناول الظواهر الكهربائية ، وأخيراً نستخدم نظرية الشبكات في مجال أنواع بسيطة وخاصة من الاجهزة الميكانيكية والكهربائية . يمكننا استخدام علم الحساب بشكل عام جداً لعد الناس ، الاحجار أو النجوم ، بينما نطبق الهندسة لقياس الأرض ، البحر ، أو المجرات .

ان نظرية الاتصالات هي نظرية مجردة بمعنى أنها تنطبق على أنواع متنوعة من الاتصالات : المكتوبة ، الصوتية ، أو الكهربائية وذلك بخلاف قوانين نيوتن للحركة ومعادلات ماكسويل والتي هي نظريات فيزيائية بمعنى أنها ترتبط بصنوف معينة من الظواهر الفيزيائية . تعنى نظرية الاتصالات بجوانب هامة ومجردة من الاتصالات ، وهي تنطلق من فرضيات محددة وواضحة لتصوغ نظريات تتعلق بمصادر المعلومات وأقنية الاتصالات . انها بهذا المعنى نظرية رياضية ، ولفهمها ، يتوجب علينا أولاً ان نتفهم فكرة النظرية على أنها العبارة التي تتطلب البرهان أي كونها نتيجة لازمة لمجموعة من الفرضيات الأولية . ان هذه الفكرة هي قلب الرياضيات كما يفهمها الرياضيون .



## الفصل الثاني

### أصول نظرية المعلومات

لقد كان الناس دائماً على خلاف فيما يتعلق بقيمة التاريخ فلقد درس بعضهم الاحقاب الغابرة في محاولة استشفاف نظام شامل للعالم يستطيع ان يستجلي بين ثناياه المستقبل والماضي على السواء بينما رأى الآخرون في الماضي وصفات ناجعة للنجاح في الحاضر وهكذا يعتقد البعض أننا بدراسة الكشوف العلمية في وقت ما يمكننا ان نتعلم الاستكشاف بينما يشير أحد الحكماء الى أننا لا نتعلم أي شيء من التاريخ ما عدا أننا لا نتعلم أبداً أي شيء من التاريخ ،، بينما يؤكد هنري فورد ان التاريخ مجرد هراء .

يقع كل ذلك أبعد مما أرمي اليه وأبعد من أهداف هذا الكتاب الا أنني سأظل متمسكاً بأن بإمكاننا ان نتعلم أمرين على الأقل من تاريخ العلم .

أولهما ان أهم الكشوف العلمية وأقواها لم تنبثق من خلال دراسة الظواهر كما تحدث في الطبيعة وإنما من خلال دراسة الظواهر فيما صنعه الانسان وفي المنتجات التكنولوجية اذا صح التعبير ، ذلك ان الظواهر في ادوات الانسان مبسطة ومرتبة بالمقارنة مع تلك التي تقع في الطبيعة وهذه الظواهر المبسطة هي التي يسهل فهمها على الانسان .

لذا فان وجود الآلة البخارية أعطى دفعة قوية لظهور علم الديناميكا الحرارية ( الترموديناميك ) ، وتتجلى في الآلة البخارية ظواهر الحرارة

والضغط والاستبخار والتكاثف بشكل بسيط ومرتب واننا نلاحظ ذلك بشكل خاص في اعمال كارنو . وكان كارنو ( ١٧٩٦ - ١٨٣٢ ) اول من اقترح التمدد المثالي للغازات ( دورة كارنو ) وربط به امكان استخلاص اكبر كمية ممكنة من الطاقة الميكانيكية وذلك من مجمل طاقة البخار المتوفرة . اما معلوماتنا عن علمي تحريك السوائل والغازات فقد تراكت اثر اختراع الطائرات والسفن وليس بسبب وجود الطيور والاسماك .

واخيراً استطعنا معرفة الكثير عن الكهرباء من خلال الاختراعات الانسانية دون اللجوء الى البروق والصواعق .

وسنجد بشكل مقابل تماماً ، جذور نظرية شانون الانيقية والرجبة في الاتصالات عبر التظاهرات المبسطة والمفهومة والمربطة بالبحث البرقي .

يملي التاريخ علينا درسه الثاني موضعاً الصعوبات الجمة التي يدفعها الانسان ثمناً للمعرفة والفهم . تبدو قوانين نيوتن في عصرنا بسيطة لا مناص من اللجوء اليها على الدوام ، الا انها كانت في يوم من الايام مجرد حلم عجز امله اكثر الرجال عبقرية وابداعاً . ان المكتشفين انفسهم يبدوون في كثير من الاحيان مشتتين بشكل ملفت للنظر حقاً . يتوقع احدنا مثلاً ان يجد في بحث ماكسويل عن الكهربائية والمغناطيسية اعلاناً بسيطاً وجريئاً حول القفزة النوعية التي حققها ، على العكس ، ان بحث ماكسويل ذاك تكتنفه الفوضى وتتداخل فيه امور صغيرة بدت في يوم من الايام على قدر من الاهمية بحيث ان اكثر القراء تخصصاً سيصطر للبحث طويلاً عن الاكتشاف الجديد واعادة صياغته على الشكل البسيط المألوف لديه . الا ان ماكسويل كان قد ثبت قضيته بشكل واضح في مخطوطة اخرى .

وهكذا يقدم لنا تمحيص اصول الافكار العلمية فائدة جمة فيما يتعلق باجراء التقييم الحقيقي للجهود التي وظفت بغية الظفر بالمعارف والافكار الجديدة . لقد كان منظراً مألوفاً في الايام الغابرة ان نرى المفكرين

يحمون حول حواف المكتشفات الجديدة دون أن يكون بإمكانهم تنفيذ الخطوة النهائية . نشعر في كثير من الاحيان اننا يجب ان ننوب عنهم بالكلام وتؤكد انهم وصلوا فعلاً الى النتائج النهائية المتوخاة كونهم قد استطاعوا رصف الكثير من الافكار المبتغاة وفق النسق لصحيح . ولعله امر متواتر ان يقع الكثير من الرافضين في فخ مماثل اثناء حياتهم ، فعدد لا بأس به ممن استطاعوا حل مشاكل لم يكن لديهم عنها من معطيات في البداية الا افكار ضئيلة ، اعتقدوا فيما بعد انهم احاطوا بالموضوع وبكل جوانبه وتفاصيله .

لذا فالنتيجة الحتمية ان العودة الى اصول الفكرة تساعد في فهم محتوياتها ، وفي مقدمة تلك الاصول ماذا كانت درجة فهم الموضوع قبل انبثاق الفكرة وكيف تم تحقيق الوحدة والوضوح بعد ذلك . الا ان تحقيق الفهم الصحيح يتطلب منا متابعة المسار الفعلي للاكتشافات ، وليس المسار الذي نشعر ان المكشوف العلمية كان من الممكن او من الواجب ان تسير وفقه ، كما ان علينا ان نقف من المشاكل ( اذا استطعنا ذلك ) كما وقف منها المكتشفون الاوائل لا كما نراها اليوم .

ان التطلع الى معرفة اصول نظرية المعلومات يدفعنا الى متاهات لا نهاية لها كان من الممكن لي ان اتحاشاها بكل سرور ، الا ان الآخرين يدفعون قرائهم على الدوام للدخول فيها . وكل ما ارجوه ان نخرج منها بدون آثار سلبية تذكر سيما اننا سنعرض للموضوع وفق التسلسل التالي .

يستخدم علما الديناميكا الحرارية والميكانيك الاحصائي مصطلحاً خاصاً هو الانتروبي ، كما تستخدم نظرية الاتصالات كمية تدعى الانتروبي ، وننوه هنا الى قدم العلمين الاولين بالمقارنة مع نظرية الاتصالات . لقد استخدم الفيزيائي ل. سزيلارد في بحث له عام ١٩٢٩ مفهوماً معلوماتياً معيناً لتحليل تناقض فيزيائي . نخلص من هذه الحقائق الى نتيجة مفادها ان نظرية الاتصالات قد نشأت بشكل ما من الميكانيك الاحصائي .

لقد سبب هذه الفكرة البسيطة والمضللة فوضى كبيرة حتى بين التقنيين . ان منشأ نظرية الاتصالات يعود الى المحاولات التي جرت لحل بعض المشاكل المتعلقة بالاتصالات الكهربائية ، وقد دميت الانتروبي الخاصة بها بالانتروبي بالمعادلة الرياضية مع الانتروبي الخاصة بالميكانيك الاحصائي . تبرز الاهمية الخاصة لانتروبي نظرية الاتصالات في معالجة جملة من المواضيع مختلفة بشكل كامل عن تلك التي يتناولها الميكانيك احصائي .

تعتمد الانتروبي الخاصة بكتلة غازية في الديناميكا الحرارية على درجة حرارة الغاز وحجمه وكتلته ونوعيته تماماً كما تعتمد طاقتها على نفس العوامل . اذا وضعنا كمية من الغاز في اسطوانة مغلقة ومحكمة الاء من احد طرفيها حيث يمكن لمكبس أن يتحرك بحرية وتركنا الغاز يتمدد فان درجة حرارته ستخفض ويفقد بالتالي جزءاً من طاقته الحرارية ويظهر اثر هذا الانخفاض كفعل دفع على المكبس ، ويمكن لهذا العمل ان يستخدم مثلاً لرفع وزن ما ، وفي هذه الحالة سيدخر الوزن الطاقة التي فقدتها الغاز .

ان هذه العملية هي عملية عكوسة ، ونعني بذلك اننا اذا بدلنا عملاً لدفع المكبس نحو داخل الاسطوانة ببطء ولضغط الغاز بالتالي حتى يستعيد حجمه الاصلي واذا ذاك يسترد الغاز طاقته الاولى وكذلك يعود الى ضغطه ودرجة حرارته الاصلين . تتميز هذه العملية العكوسة بثبات الانتروبي وتغير الطاقة خلالها .

تعتبر الانتروبي لذلك مقياساً للعكوسية ، فاذا بقيت الانتروبي ثابتة كانت العملية عكوسة ، ففي مثالنا تتحول الطاقة بشكل متكرر بين شكلها الحراري في الغاز المضغوط وشكلها الميكانيكي في الوزن المرفوع .

ان معظم الظواهر الفيزيائية غير عكوسة . يصاحب العمليات غير العكوسة ازدياد في الانتروبي .



تخيل على سبيل المثال اسطوانة محكمة لا تسمح بتسرب الحرارة منها واليها ، وقد شطرت الى جزئين . نملأ الجزء الاول بغاز ما ونترك الثاني مفرغاً تماماً . نتصور الان ان الفاصل بين الشطرين قد زال فجأة وبشكل كامل وهذا سيسمح للغاز بالانتشار داخل كل الاسطوانة وسيزيد الانتروبي الا انه سيحافظ على طاقة الغاز دون تغيير .

كان يمكننا قبل زوال الفاصل بين الشطرين الحصول على طاقة ميكانيكية من الغاز بتركه يتدفق داخل الشطر المفرغ من الاسطوانة عبر آلة صغيرة . اما بعد زوال الفاصل بين الشطرين وازدياد الانتروبي فيصبح أمر الحصول على الطاقة الميكانيكية المشار اليها مستحيلاً . تزداد الانتروبي في ظروف مماثلة بينما تبقى الطاقة ثابتة ، ويحدث هذا مثلاً عندما تنتقل الحرارة من جسم ساخن الى جسم بارد ، وقبل تساوي درجتي الحرارة في كلا الجسمين يكون من الممكن الاستفادة من فرق الحرارة للحصول على طاقة ميكانيكية ، اما بعد التساوي فانه يستحيل علينا ان نحول اي جزء من الطاقة الحرارية الى طاقة ميكانيكية .

وهكذا فان ازدياد الانتروبي يعني نقصان قابليتنا لتغيير الطاقة الحرارية وتحويلها الى طاقة ميكانيكية . تقابل زيادة الانتروبي باختصار انخفاضاً في الطاقة الجاهزة .

لقد اعطانا علم الديناميكا الحرارية مفهوم الانتروبي ، الا انه لم يعط تصوراً فيزيائياً مفصلاً لهذا المفهوم بدلالة سرعة الجزيئات ومواقعها مثلاً . يؤمن الميكانيك الاحصائي معنى ميكانيكا مفصلاً للانتروبي في بعض الحالات الخاصة . وبصورة عامة يترافق ازدياد الانتروبي مع نقصان النظام اي ازدياد الفوضى . اما اذا سألنا ماذا نعني بالنظام ، فعلياً ان تربط النظام بشكل ما مع المعرفة . واذا تمكنا من معرفة موقع وسرعة كل جزيء ضمن تركيب جزيئي بالغاً ما بلغ من التعقيد ، فسيصعب علينا اخراجه عن حالة النظام اذ ذاك . تعني الفوضى في الميكانيك الاحصائي عدم قابلية التنبؤ المستندة الى فقدان المعلومات الضرورية عن مواقع وسرعة

الجزئيات . اننا نفتقد هذه المعلومات في الحالات العادية عندما يكون نظام المواقع والسرع معقدا بدرجة كبيرة .

لنعد الى مثالنا حيث حبست كل جزئيات الغاز في احد شطري الاسطوانة المعتبرة . اذا كانت هذه الجزئيات بكاملها فعلا في ذلك الشطر واذا كنا بدورنا نعلم ذلك فان الانتروبي ستكون اقل منها في حالة انتشار الغاز في شطري الاسطوانة ، ذلك لان علمنا الاكيد بوجود الجزئيات في الشطر الاول سيؤمن لنا معرفة اكبر عن مواقع الجزئيات بالمقارنة مع الحالة التي ينتشر فيها الغاز عبر شطري الاسطوانة . كلما ازدادت معرفتنا التفصيلية بجملة فيزيائية نقصت ربيتنا بها ( مثلا فيما يتعلق بمواقع الجزئيات ) وكانت الانتروبي بالتالي اقل . وعلى العكس تزداد الريبة بازدياد الانتروبي .

لذا اربطت الانتروبي في الفيزياء بامكانية تحويل الطاقة الحرارية الى طاقة ميكانيكية . اذا لم تتغير الانتروبي خلال عملية ما ، كانت هذه العملية عكوسة . واذا ازدادت الانتروبي نقصت الطاقة الجاهزة . يفسر الميكانيك الاحصائي ازدياد الانتروبي على انه نقصان في النظام او ، اذا رغبتنا ، نقصان في درجة معرفتنا .

ان تطبيقات وتفاصيل الانتروبي في الفيزياء هي اكبر مما عرضته بكثير ، ولكنني اعتقد انني استطعت ابضاح الفكرة وبعضاً من اهميتها . ننتقل الان الى الاهداف والاستخدامات الاخرى لمفهوم الانتروبي في نظرية الاتصالات .

نعتبر في نظرية الاتصالات مصدر ارسال ككاتبه او مذياع ، والذي يمكنه في ظرف معين اصدار رسالة من جملة رسائل ممكنة . يزداد الكم المعلوماتي المنقول عبر الرسالة بازدياد الريبة المقابلة لاصدار رسالة معينة . ان الرسالة المصدرة من اصل عشرة رسائل ممكنة تنقل كما معلوماتياً اقل من رسالة منتقاة من اصل مليون رسالة ممكنة . ان الانتروبي

نظرية الاتصالات هي قياس لهذه الرتبة ، والرتبة أو الانتروبي هي معيار الكم المعلوماتي المنقول عبر رسالة من مصدر مرسل . ان ازدياد معلوماتنا عن تحديد الرسالة التي ستنبثق عن المصدر سيقلل الرتبة وبالتالي الانتروبي وهذا سينعكس في نقص بالكم المعلوماتي .

تترتب نتيجة هامة على ما قدمناه ، وهي ان اختلافا جذريا يميز بين الافكار التي كانت وراء تطوير مفهوم الانتروبي في الفيزياء وتلك التي لعبت دورا اساسيا في تطوير مفهوم الانتروبي في نظرية الاتصالات . ان كلا من المفهومين فعال ومفيد دون ضرورة العودة الى الآخر . وعلى الرغم من ذلك فانثروبي الميكانيك الاحصائي وانثروبي نظرية الاتصالات يمكن ان يعبر عنهما بدلالة الرتبة في عبارات رياضية متشابهة . نتساءل هنا عما اذا كان ممكنا صياغة علاقة متميزة ومفيدة بين هذين المفهومين للانثروبي واكثر من ذلك علاقة بين الفيزياء والنظرية الرياضية للاتصالات .

لقد حاول الكثيرون من الرياضيين والفيزيائيين ابراز أهمية نظرية الاتصالات والانثروبي الخاصة بها في مجال الميكانيك الاحصائي ، الا ان هذا الموضوع مازال ضبابيا وغير واضح ، وتزداد حالة التخبط في هذا الموضوع عندما يتسرب اكثر من معنى لكلمة المعلومات الى بحث ما . وهكذا تربط كلمة المعلومات بمفهوم المعرفة وفق معناه المتداول بأكثر مما تربط بالرتبة وحل الرتبة كما هو الامر في نظرية الاتصالات .

سنعرض للعلاقة بين الفيزياء ونظرية الاتصالات في الفصل العاشر بعد ان نكون قد بلغنا مستوى جيد من فهم تلك النظرية . وكل ما استطيع قوله الان ان المحاولات الرامية لعقد قران بين الفيزياء ونظرية الاتصالات لم تشمر ومازالت موضع اهتمام كبيرة ، اذ ان تلك المحاولات لم تتمخض عن نتائج اكيدة او تفهم اكبر ، مقابل ما حققته نظرية الاتصالات ذاتها .

تقع اصول نظرية الاتصالات في الابحاث الخاصة بالاتصالات الكهربائية وليس في الميكانيك احصائي ، كما ان بعض المفاهيم المرتبطة بها تعود الى ولادة الاتصالات الكهربائية .

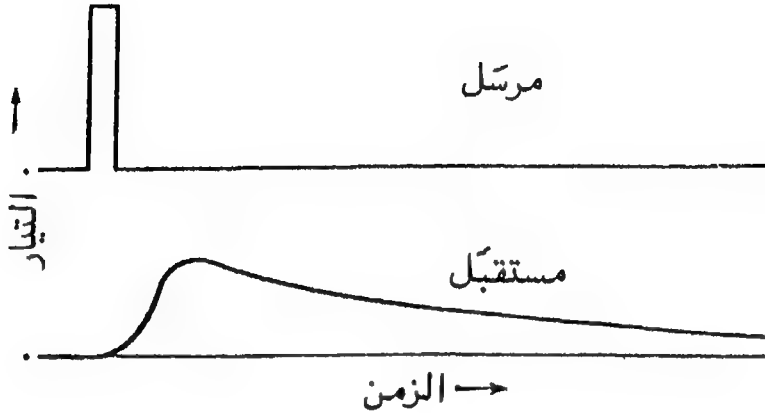
بدا صموئيل ف. ب. مورس أول جهد كبير ناجح لتحقيق الاتصالات  
البرقية الكهربائية عام ١٨٣٢ خلال رحلة عبر الأطلسي . لقد كانت برقية  
مورس الأولى أعقد بكثير مما نلم به الآن واحتوت على جملة من الخطوط  
الطويلة والقصيرة ، ولم تكن سلاسل الخطوط تلك ممثلة للكلمات ، بل  
مثلت أعدادا ارتبطت بكلمات في قاموس خاص أو كتاب ترميز أكمله مورس  
عام ١٨٣٧ . سنرى فيما بعد أن هذه الطريقة للترميز هي طريقة فعالة  
حتما ، ولكنها طريقة غير مصقولة يعوزها الاتقان .

لقد أهمل مورس طريقة الترميز الأصلية هذه بينما كان يعمل في  
نفس الموضوع مع الفرد فيل وتم ابتكار ترميز مورس ( شيفرة مورس )  
عام ١٨٣٨ تلك الشيفرة التي نستخدمها اليوم . تمثل الأحرف الأبجدية  
وفق هذا الترميز بفراغات وخطوط ونقط فالخط نبضة كهربائية مدبدة ،  
بينما النقطة نبضة كهربائية قصيرة ، وأخيرا يقابل الفراغ انقطاع الموجة  
الكهربائية .

لقد تم مزج الخطوط والنقاط بمهارة لترميز كل الأحرف الأبجدية ،  
مثلا يتواتر الحرف E في اللغة الانكليزية ضمن معظم الكلمات لذا اختير  
له أقصر رمز ممكن : نقطة واحدة . لقد تم ترميز الأحرف بصورة عامة  
بحيث تستخدم الرموز القصيرة للأحرف الأكثر تواترا والرموز الطويلة  
للأحرف الأقل تواترا . ومن الغرابة بمكان أن هذا الخيار قد تم دون  
الرجوع إلى جداول تبين التواترات المختلفة للأحرف في نصوص اللغة  
الانكليزية ولم تعد الأحرف في أي نص للحصول على مثل هذه المعلومات .  
لقد تم الحصول على التواترات النسبية لورود مختلف الأحرف بعد مختلف  
المطابق في الأجزاء المختلفة لمعبة آلة كتابة .

يمكننا أن نتساءل عما إذا كان باستطاعتنا بث الرسائل باللغة الانكليزية  
برقياً بسرعة أكبر وذلك بلجوئنا إلى ترميز الأحرف بشكل مختلف عن  
ترميز مورس . تجيبنا نظريتنا المعاصرة أننا لن نحقق زيادة في السرعة  
بأكثر من ١٥ ٪ لقد كان مورس ناجحاً للغاية في هذا المجال ، وكان الأمر  
واضحاً بدهنه تماما .

لقد قدم ترميز مورس درساً هاماً مفاده أن الطريقة التي تتم وفقها ترجمة الرسالة إلى إشارات كهربائية لها أهمية كبيرة ويقع هذا الموضوع من نظرية الاتصالات في القلب .

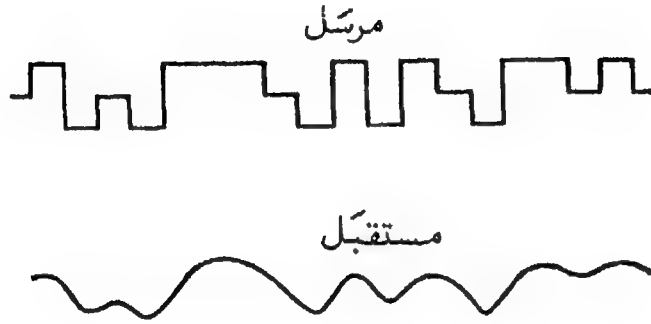


الشكل ٢ - ١

أقر الكونغرس الأمريكي عام ١٨٤٣ ميزانية خاصة لإنشاء دائرة برفيت بين واشنطن وبالتيمور . بدأ مورس بمد الأسلاك تحت الأرض إلا أنه سرعان ما واجه مصاعب كبيرة تطورت فيما بعد للاضرار بالكابلات تحت المائية ، فلجأ إلى حل مشاكله الآتية بمد الأسلاك على أعمدة .

لقد بقيت المصاعب التي واجهها مورس في أسلاكه الممدودة تحت الأرض بارزة كمسكلة هامة . أن الدارات المتكافئة في نقلها للتيار الكهربائي المستمر ليست جميعها مناسبة بنفس الدرجة للاتصالات الكهربائية . إذا تم إرسال خطوط ونقاط بسرعة كبيرة عبر دائرة تحت أرضية أو تحت مائية ، يجري استلامها عند الطرف الآخر في وقت واحد . يبين الشكل ٢ - ١ أنه عندما نرسل نبضة كهربائية قصيرة بشكل متواتر عبر فترات انقطاع ، فإنها تصل الطرف الآخر من الدارة على شكل نبضة كهربائية مستمرة ومتصلة ، وربما يتداخل هذا الإرسال الطويل مع الإرسال الخاص

برمز آخر ويحدث نتيجة التداخل كما وان فترة انقطاع قد مرت .  
وهكذا وكما يبين الشكل ٢ - ٢ ، عندما نرسل قطار من الاشارات  
متميز وواضح فقد يصل الطرف الاخر على شكل موجة كهربائية مستمرة  
متلوية صاعدة وهابطة وبالتالي صعوبة التفسير . اذا حاولنا جعل الخطوط  
والنقاط والفواصل أطول زمنا فسيصبح تيار الاستقبال تيار الارسل



الشكل ٢ - ٢

بشكل جيد ، الا ان ذلك سيبطيء سرعة الارسل . ويبدو واضحا ان  
هناك سرعة حدية لارسل النقاط والفواصل لكل دائرة ارسل . تكون  
السرعة منخفضة في حالة الكوابل تحت البحرية لدرجة توزيع مستخدمي  
الاتصال الكهربائي ، بينما تساعد الاسلاك الممتدة على اعمدة بسرور  
ارسالها الكبيرة لقد تنبه المرسلون الاوائل لهذه المشكلة التي تشكل  
بدورها جزءاً هاماً من نظرية الاتصالات .

يمكن ان نتحايل بأشكال مختلفة على الرغم من هذه المحدودية في  
السرعة لزيادة عدد الاحرف المرسلة عبر دائرة معينة وخلال فترة زمنية

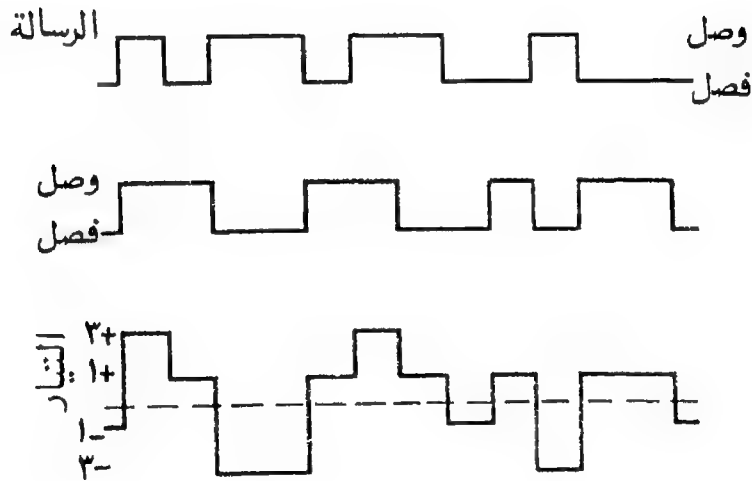
محددة . يستغرق ارسال الخط ثلاثة اضعاف المدة اللازمة لارسال النقطة . وقد تبينت بسرعة الفوائد الحجة التي يقدمها الارسال مزدوج التيار . يمكننا تفهم ذلك بتصور ربط مقياس غلفاني بين نقطة الاستقبال والارض ، والمقياس الغلفاني هو جهاز يضبط ويحدد اتجاه التيارات الكهربائية الضعيفة . يربط المرسل القطب الموجب من بطاريته الى السلك والقطب السالب الى الارض ، ويتحرك بذلك مؤشر المقياس الغلفاني الى اليمين، محددا نقطة ، ولتحديد خط ، يربط المرسل القطب السالب من بطاريته الى السلك والقطب الموجب الى الارض ، فيتحرك مؤشر المقياس الغلفاني الى اليسار . نصلح بذلك على أن اتجاه التيار في جهة معينة ( داخل السلك ) يمثل نقطة واتجاهه في الجهة المعاكسة ( خارج السلك ) يمثل خط ، بينما يمثل انقطاع التيار الفاصل ( حالة فصل البطارية ) . اما في الحالة الفعلية للارسال المزدوج التيار فيستخدم جهاز مستقبل من نوع مختلف .

نستخدم في الارسال وحيد التيار عنصرين لصنع رموزنا . تيار ولا تيار ، واللذين يمكن أن نسميهما واحد وصفر ، ويقابل ذلك في حالة الارسال مزدوج التيار ثلاثة عناصر هي : التيار الامامي أو التيار داخل السلك ، ولا تيار ، والتيار الخلفي أو التيار خارج السلك ، ويمكن تسميتها ايضا : + ، ١ ، ٠ ، - ١ . نستخدم هنا اشارتي الزائد والناقص للدلالة على اتجاه التيار بينما يبين العدد ١ شدة أو قوة ذلك التيار وهو في هذه الحالة يساوي لدفق التيار في كلا الاتجاهين .

لقد ذهب توماس اديسون عام ١٨٧٤ بعد من ذلك . ففي نظام ارساله الرباعي استخدم شدتين واتجاهين للتيار ، وكان بمقدوره ارسال رسالة أولى بتغيير الشدة وبصرف النظر عن اتجاه التيار وارسال رسالة ثانية بتغيير الاتجاه مهما كانت تغيرات الشدة . اذا فرضنا ان التيارات تفرق عن بعضها بدرجات متساوية ، فاننا نستطيع تمثيل الشروط الاربعة لدفق التيار باستخدام الاعداد : + ٣ ، + ١ ، - ١ ، - ٣ . يوضح الجدول التالي تفسير ذلك عند النهاية المستقبلية من الدارة .

التيار المرسل	المعنى	الرسالة الاولى	الرسالة الثانية
٣ +	مرسلة	مرسلة	مرسلة
١ +	متوقفة	متوقفة	مرسلة
١ -	متوقفة	متوقفة	متوقفة
٣ -	مرسلة	مرسلة	متوقفة

يوضح الشكل ٢ - ٣ كيف يمكن لمتتالية مكونة من اربع قيم مختلفة للتيار تمثيل الخطوط والنقاط والفواصل الخاصة برسالتين آيتين مستقلتين .



الشكل ٢ - ٣

يتوقف الكم المعلوماتي المرسل عبر دائرة معينة ليس فقط على سرعة ارسال الرموز المتتالية ( القيم المتتالية للتيار ) بل أيضا على عدد الرموز المختلفة المتوفرة والتي يمكن اجراء الخيار بينها ( مختلف قيم التيار ) .



إذا استخدمنا كرمزين التيارين + ١ وصفر فقط أو وبنفس الكفاءة التيلورين + ١ و - ١ فاننا نستطيع ان ننقل الى المستقبل واحدة فقط من امكائيتين عند لحظة معينة . لقد رأينا للتو أنه إذا أجرينا الخيار بين أربعة قيم للتيار ( أحد أربع رموز ) في وقت معين مثل : + ٣ أو + ١ أو - ١ أو - ٣ فاننا نستطيع بقيم التيار هذه الرموز نقل معلومتين مستقلتين : سواء اكنا نعني صفر أو واحد في الرسالة الاولى أو اذا كنا نعني صفر أو واحد في الرسالة الثانية . وهكذا فان استخدام أربعة قيم للتيار ، ومن أجل سرعة معينة لارسال الرموز المتتالية ، يمكننا من ارسال رسالتين مستقلتين وبسرعة لكل منهما تكافئ ما تسمح لنا به قيمتان للتيار من سرعة في ارسال رسالة واحدة . اننا نستطيع ارسال ضعف العدد من الاحرف في الدقيقة باستخدام أربعة قيم للتيار بالمقارنة مع ما يمكننا ارساله باستخدام قيمتين للتيار .

يقود استخدام التعددية في الرموز الى صعوبات كبيرة . لقد رأينا ان الخطوط والنقاط المرسلة عبر سلك تحت مائي تميل الى الانتشار والتداخل . لذا فان بحثنا عن رمز معين عند نهاية الدارة سيضعنا في مواجهة عدد آخر من الرموز كما يوضح الشكل ٢ - ٢ . وهكذا فالتحديد الأبسط في مثل هذه الحالات كالتحديد ١ وصفر أو + ١ و - ١ هو في واقع الأمر أسهل وأكثر تأكيداً من تحديد معقد مثل + ٣ ، + ١ ، - ١ ، - ٣ .

تحد أمور أخرى من قابليتنا لاجراء مفاضلات معقدة ، فمثلا تظهر اشارات اضافية على خطوط الارسال والكوايل البحرية ابان العواصف المغناطيسية ، اذ أن تغيرات الحقل المغناطيسي الارضي تولد تيارات كهربائية في الكوايل ، وهذه التغيرات بدورها تتسبب عن الريح الشمسية . وإذا دققنا أكثر باستخدام المضخمات الالكترونية الحساسة، لاكتشفنا وجود تيارات كهربائية دقيقة وغير مستحبة بشكل دائم . تشبه هذه التيارات الحركة البراونية للذرات الصغيرة المشاهدة باستخدام المجهر وأيضا اضطرابات جزئيات الهواء وكل ما يرتبط

بدرجات الحرارة والتغيرات الحرارية . ان التيارات الدخيلة ، والتي ندعوها بالضجيج ، موجودة ومهيأة على الدوام لتتداخل مع الاشارات المرسله .

واذا استطعنا تحاشي ظاهرة التداخل بين النقاط والفواصل والتي نسميها بالتداخل بين الرموز ، فان الضجيج على الرغم من ذلك سيحاول تشويه الاشارة المستقبلية ويزيد بالتالي في صعوبة التمييز بين بدائل متعددة من الرموز . لذا فان زيادة شدة الاشارة المرسله والتي تتحقق بزيادة التيار المرسل ستساعد في التغلب على آثار الضجيج . ومهما يكن من أمر فهناك حدود للطاقة الممكن استخدامها . يستلزم ارسال تيار عالي عبر كابل بحري كمونا عاليا وهذا بدوره يمكن أن يدمر عزل هذا الكابل ، بل ويمكن أن يسبب دارة قصيرة ، ومن المحتمل أن الكمون العالي الدافع الذي استخدم عام ١٨٥٨ أفشل الرسالة البرقية الاولى في كابل عبر الاطلسي .

لقد استطاع حتى رجال البرق الأوائل أن يتفهموا وبالبداهة جانباً لا بأس به من المحدودية في سرعة ارسال ، التداخل ، الضجيج ، وكذلك صعوبة التمييز بين بدائل مختلفة من قيم التيار وأخيراً القيم العظمى للطاقة التي يمكن توظيفها . الا ان الحاجة كانت تقضي بتجاوز هذا الفهم البدهي للمشاكل المطروحة الى تحليل رياضي عميق لها .

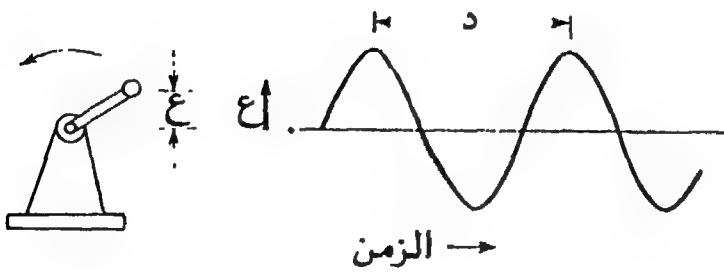
استخدمت الرياضيات منذ وقت بعيد لدى التصدي لهذه المشاكل ، الا أن الايضاح الكامل لها لم يأت الا في السنوات الاخيرة . قام ويليام شومسون ( وعرف فيما بعد بلورد كالفن ) عام ١٨٥٥ بحساب القيم الدقيقة للتيار المستقبل عندما ترسل نقطة او فاصل عبر كابل بحري . أما التناول الأقوى لهذه المشاكل فقد أعقب اختراع الهاتف عام ١٨٧٥ على يد الكسندر غراهام بيل . لا يستخدم الهاتف الاشارات البرقية البطيئة المستندة لقطع ووصل التيار بل يستخدم جملة تيارات تختلف شداتها بشكل مستمر وناعم عبر ساعات مختلفة وبسرع تعادل عدة مئات السرعة المستخدمة في البرق اليدوي .

ساعد عدد من العقول الجبارة في المعالجة الرياضية لاختراع الاتصال الهاتفي ومن أبرز الأسماء المساهمة : الرياضي الفرنسي العظيم هنري بوانكاريه ، العبقرى الانكليزي المتواضع اوليفر هيفيسايد والمخترع ميشيل بابين وأخيرا جورج كامبل من شركة الهواتف والبرق الأمريكية .

كانت الطرائق الرياضية التي استخدمها هؤلاء العلماء امتدادا لتلك التي استخدمها الرياضي والفيزيائي الفرنسي جوزيف فورييه في القرن التاسع عشر لدراسة التدفق الحراري . لقد طبقت هذه الطريقة لدراسة الاهتزازات وكانت وسيلة ناجحة لتحليل التيارات الكهربائية المتغيرة على نحو معقد كما هي الحال في تيارات الهاتف والبرق .

يستحيل علينا التقدم دون فهم بعض مساهمات فورييه ، تلك المساهمات التي اثبتت ضرورتها في كل الاتصالات وفي نظرية الاتصالات . ان الافكار الاساسية ولحسن الحظ بسيطة للغاية ، اما عن براهينها والتعقيدات المترتبة على تطبيقها ، فسنضطر الى حذفها هنا .

لقد بنى فورييه معالجاته الرياضية لمسألة التدفق الحراري على تابع رياضي خاص يعرف باسم تابع الجيب . يوضع الجزء الأيمن من الشكل ٢ - ٤ جزءا من هذا التابع .



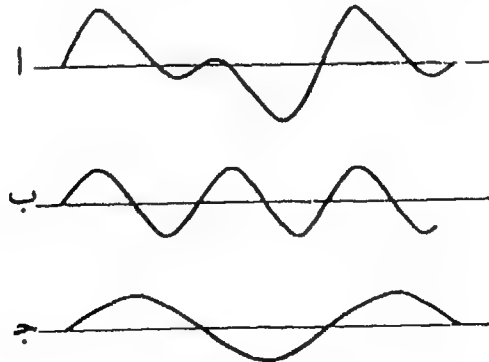
الشكل ٢ - ٤

يتغير ارتفاع الموجة ع نحو الأعلى والأسفل بمرور الوقت ويتكرر هذا التقلب دائماً وابتداً . ليس للموجة الجيبية بداية أو نهاية وهي ليست مجرد منح منتهز مستمر ، اذ ان ارتفاع الموجة ( والذي يمكن أن يمثل شدة التيار أو الكمون ) يتغير وفق ايقاع خاص مع مرور الزمن . يمكننا أن نمثل هذا التغير بحركة ذراع مرتبط بمقبض يدور بسرعة ثابتة ، كما هو مبين في يسار الشكل ٢ - ٤ . يتغير ارتفاع الذراع فوق المحور ع بشكل جيبى تماماً مع الزمن .

ان الموجة الجيبية هي مجرد مثال بسيط للتغيرات في مجرى الزمن . ويمكن أن نعنيها أو أن نصفها وأن نميزها عن غيرها من الامواج الجيبية بواسطة ثلاث كميات ، احدى هذه الكميات هي اكبر ارتفاع فوق الصفر وتسمى السعة ، أما الكمية الأخرى فهي لحظة بلوغ اكبر ارتفاع وتسمى الطور ، وأخيراً الفترة الزمنية الفاصلة بين بلوغين متتالين للارتفاع الأكبر وتسمى الدور د . نستعاض عادة عن استخدام الدور باستخدام مقلوبه  $\frac{1}{D}$  ويدعى التواتر ونرمز له بالحرف  $\theta$  . وهكذا اذا كان دور

الموجة الجيبية  $\frac{1}{100}$  من الثانية كان تواترها ١٠٠ هزة في الثانية

واختصاراً ١٠٠ هـ في ث . وتعرف الهزة على أنها مجمل التغير بدءاً من قمة معينة للموجة مروراً بحضيض لها وحتى قمة تالية . أما كون الموجة الجيبية دورية الطابع فيعني أن التغير المذكور بين قمتين متتاليتين مروراً بحضيض متوسط يكرر نفسه بشكل متطابق تماماً .



الشكل ٢ - ٥

نجح فورييه في البرهان على نظرية حول الامواج الجيبية ادهشت معاصريه كثيراً . فقد اثبت ان تغير اية كمية مع الزمن يمكن ان يمثل بدقة كاملة كمجموع عدد من التغيرات الجيبية تختلف عن بعضها بالسعات والاطوار والتوحيات . ويمكن ان تكون الكمية المعنية انزياح وتر مهتز ، او منسوب الامواج المتلاطمة في البحر ، او درجة حرارة شاردة كهربائية واخيراً شدة او كون التيار في سلك هاتف او مبرقة . ان القوانين الحاكمة لكل هذه الظواهر يمكن ان تخضع لتحليل فورييه ويوضح الشكل ٢ - ٥ هذه القضية بشكل مبسط فارْتِفاع المنحني الدوري ٢ فوق المحور يساوي مجموع ارتفاعي المنحنيين الجيبيين ب ، ح .

يبدو تمثيل التغيرات المعقدة مع الزمن لكمية فيزيائية معينة مجموع تغيرات جيبية بسيطة مجرد مهارات رياضية وحسب . الا ان الاستفادة من ذلك التمثيل تستند في واقع الامر الى حقيقتين فيزيائيتين . لا تتغير دارات ارسال الاشارات الكهربائية مع الزمن ويتبع سلوكها ما يدعى بالنمط الخطي . نفرض مثلاً اننا ارسلنا اشارة واحدة ندموها باشارة الدخل عبر السلك ورسمنا منحنياً يمثل التغيرات الزمنية لسعة الاشارة المستقبلية ، ثم كررنا نفس العمل من اجل اشارة دخل اخرى ، ثم جمعنا اشارتي الدخل اي شكلنا اشارة جديدة يساوي تيارها عند كل لحظة المجموع البسيط لتياري الاشارتين لحصلنا عند ذلك على اشارة مستقبلية جديدة او اشارة خرج تساوي المجموع البسيط لاشارتي الخرج المقابلتين لاشارتي الدخل المعبرتين .

نستطيع ان ندرك على الفور ان دارات الاتصالات لا تتغير على نحو هام مع الوقت . يمكننا شرح مفهوم الخطية كما يلي : اذا عرفنا اشارات الخرج وبشكل منفصل لعدد من اشارات الدخل المرسله بشكل مستقل ، ثم ارسلنا اشارات الدخل هذه في وقت واحد ، فان اشارة الخرج الناتجة في هذه الحالة تساوي المجموع البسيط لاشارات الخرج المنفصلة المشار اليها . وهكذا ففي دائرة كهربائية خطية او نظام بث ، تتصرف لاشارات كما لو كانت موجودة بشكل مستقل عن بعضها ، انها ببساطة

لا تتداخل . نشير هنا الى ان هذا المفهوم الاخير هو في واقع الامر المعيار الذي نحكم بواسطته على دارة ما على انها خطية .

ان كون الخطية تظاهرة مدهشة للطبيعة لا يعني انها نادرة على الاطلاق اذ تشمل صفة الخطية كل الدارات التي قدمنا لها في الفصل الاول والمؤلفة من المقاومات والمكثفات والمحثات . كذا شأن الاسلاك والكوابل البرقية . ان كل الدارات الكهربائية ، في واقع الامر خطية ، باستثناء تلك التي تتضمن الانابيب المفرغة او الثرانزستورات او الصمامات ، على الرغم من ان هذه الاخيرة تكون في بعض الاحيان خطية فعلا .

يمكن لشارحتين برقيتين الانتقال باتجاهين متعاكسين عبر سلك واحد وفي وقت واحد دون ان تتداخلا ويعود ذلك لكون الاسلاك البرقية خطية اي ان الاشارات الكهربائية المحمولة عليها تتصرف بشكل مستقل دون ان تتبادل التأثير . ليست الخاصة الخطية ظاهرة طبيعية عامة ، رغمًا من كونها مألوفة في الدارات الكهربائية ، فلا يستطيع قطاران مثلاً الحركة باتجاهين متعاكسين على نفس الخط الحديدي دون ان يتداخلوا . وما على القارئ الا ان يتصور طالع السوء لصف خطي من الكائنات .

دعونا نعد لبث الاشارات عبر الدارات الكهربائية وقد استوعبنا خاصة الخطية المدهشة . لقد رأينا للتو انه من أجل معظم اشارات المدخل يختلف شكل اشارة الخرج وتغيرها مع الزمن بالمقارنة مع اشارة المدخل وقد أوضح الشكلان ٢ - ١ و ٢ - ٢ هذا الامر . الا انه يمكن ان نبرهن بطريقة رياضية ( لن نفعل ذلك هنا ) اننا اذا استخدمنا اشارة جيبيية كتلك في الشكل ٤ - ٢ كاشارة دخل الى محور ارسال خطي فاننا نحصل على الاوامر عند المستقبل على موجة جيبيية لها نفس الدور او التواتر ، الا ان سعة موجة الخرج الجيبيية يمكن ان تكون اقل من سعة موجة الدخل الجيبيية ، ويدعى ذلك بتخفيف الاشارة الجيبيية ، كذلك يمكن لموجة الخرج الجيبيية ان تبلغ الذروة في وقت تلاح بالنسبة لموجة الدخل الجيبيية ، وهذا ما نسميه بانحراف الطور أو تأخر الاشارة الجيبيية .

يتوقف تخامد الموجة ومقدار تأخرها على تواترها . وفي الواقع قد تعجز الدارة كلية عن نقل موجة جيبيية بتواتر معين . وهكذا اذا استخدمنا إشارة دخل مكونة من عدة مركبات جيبيية سنحصل على إشارة خرج مكونة من عدة مركبات لها نفس التواترات ولكن لها أطوار نسبية مختلفة أو تأخرات وكذلك سعات مختلفة . لذا سيختلف ، بصورة عامة ، شكل إشارة الخرج عن شكل إشارة الدخل ، ويمكن النظر الى هذا الاختلاف على انه متسبب عن التغيرات في التأخرات النسبية والسعات للمركبات المختلفة وترتبط هذه الفروق بالتوترات المختلفة . اذا كان التخميد والتأخر لدارة معينة غير متغيرين بتغير التواترات ، كان شكل إشارة الخرج هو نفسه شكل إشارة الدخل ، وكانت الدارة غير مشوهة .

لقد اوضحت هذه القضية الهامة في الشكل ٢ - ٦ .



الشكل ٢ - ٦

لدينا في الشكل ٢ - ٦ - ٢ إشارة دخل يمكن التعبير عنها كمجموع مركبتين جيبتين ب' ، ح' . لا يطرا اي تخفيف أو تأخير على الموجة ب عبر الإرسال وهكذا تكون إشارة الخروج ب والتي لها نفس تواتر ب مطابقة لـ ب' ، إلا أن الخرج ح' قد نابه التخفيف والتأخير بالمقارنة مع الدخل ح' ، وهكذا يكون للخروج آ ، وهو مجموع الخرجين ب' ، ح' ، شكلاً مختلفاً عن الدخل آ . يتكون الخروج ، مع ذلك ، من مركبتين لهما نفس التواترين المتواجدين في الدخل ، وكل ما في الامر أن مركبات التواتر لها أطوار نسبية مختلفة أو تواترات وسعات نسبية مختلفة في الخرج بالمقارنة مع الدخل .

يتيح تحليل فورييه للإشارات الى مركبات لها تواترات مختلفة دراسة خصائص الإرسال لدائرة خطية ومن أجل كل الإشارات بدلالة الإخماد والتأخر اللذين تفرضهما الدائرة على الامواج الجيبية المختلفة لتواترات التي تجتازها .

يشكل تحليل فورييه أداة فعالة لدراسة مسائل ارسال . لقد زود ذلك التحليل الرياضيين والمهندسين بنتائج واسعة التنوع لم يستطيعوا في البدء فهمها . لذا اخترع رجال البرق الاوائل كل انواع الاشكال والتراكيب من الاشارات التي تصوروها أن لها مواصفات معينة ، إلا أنهم في أغلب الاحيان اخطأوا استخدام الرياضيات وكانت مناقشاتهم غير صحيحة . لقد دارت مناقشات حامية حول كفاءة الاشارات المختلفة في الحد من النقائص التي تفرضها سرعة الدائرة وتداخل الرموز ، والضجيج ، وحدود الطاقة المرسله ،

انضم هاري نيكويست عام ١٩١٧ الى الشركة الاميركية للهاتف والبرق وذلك مباشرة بعد حصوله على شهادة الدكتوراه من جامعة يال : ( كانت شهادات الدكتوراه نادرة في تلك الايام ) . كان نيكويست ماهراً بالرياضيات وتفوق في هذا المجال على اقرانه الذين تناولوا مسائل البرق وكان على الدوام واضحاً واصيلاً ومفلساً لقضايا الاتصالات . لقد



تعمق في دراسة مشاكل البرق مستخدماً أساليب فعالة ونظرة ثاقبة .  
ونشر في عام ١٩٢٤ نتائجهُ ضمن بحث هام بعنوان : العوامل المؤثرة على  
سرعة البرق .

شمل هذا البحث عدداً من مسائل البرق ، وأوضح الى جانب اشياء  
أخرى العلاقة بين سرعة البرق وعدد قيم التيار كحالة قيمتين للتيار  
١ - ١ ، أو أربعة قيم ٣ + ، ١ + ، ١ - ، ٣ - . يقول نيكويست  
أننا اذا أرسلنا رموزاً ( قيماً متتالية للتيار ) بدفق ثابت ، فان سرعة  
الارسال و ترتبط بعدد قيم التيار م بالعلاقة :

$$و = ك \text{ لع } م$$

حيث ك هو ثابت يعتمد على عدد قيم التيار المتتالية المرسل في كل  
ثانية . يعني الرمز لع م لوغاريتم م . من المعلوم ان هناك أسساً مختلفة  
للوغاريتيمات ، وهكذا اذا اخترنا الأساس ٢ فيمكن ان نحسب لع م من  
اجل بعض قيم م وفق الجدول التالي :

لع م	م
٠	١
١	٢
١.٥٨	٣
٢	٤
٢	٨
٤	١٦

يمكننا اجمال موضوع اللوغاريتم من خلال المعادلة التالية المبينة  
لمعنى لع س :

$$\text{لع س} = ٢$$

وبأخذ لوغاريتيمات الطرفين لهذه المعادلة تثبتين لنا صحة العلاقة التالية .

$$\begin{aligned} \text{لع س} &= \text{لع ٢} \\ \text{واذا عوضنا عن لع س بالرمز ع لحصلنا على :} \end{aligned}$$

$$\text{لع ٢} = \text{ع}$$

وهذا يتفق تماماً مع ما ورد في الجدول أعلاه .

سنبين من خلال مثال موائمة اللوغاريتم . لعلاقة نيكويست .  
نفرض أننا نرغب بتجديد خيارين مستقلين لحالة الرسالة : مرسلة أو متوقفة ، ١ أو . في نفس الوقت . هناك أربعة تراكيب مختلفة للخيارين المستقلين ١ أو . كما هو موضح في الجدول التالي :

رقم التركيب	الخيار الأول . أو ١	الخيار الثاني . أو ١
١	.	.
٢	.	١
٣	١	.
٤	١	١

وإذا أردنا أكثر من ذلك تحديد ثلاثة خيارات مستقلة من الصفر أو الواحد في نفس الوقت نحصل على التراكيب الثمانية المختلفة التالية :

رقم التركيب	الخيار الأول . أو ١	الخيار الثاني . أو ١	الخيار الثالث . أو ١
١	.	.	.
٢	.	.	١
٣	.	١	.
٤	.	١	١
٥	١	.	.
٦	١	.	١
٧	١	١	.
٨	١	١	١



١- ، ٣- ، ٥- ، ٧) سيضاعف سرعة الارسال اربع مرات بالمقارنة مع قيمتين للتيار . الا انه بين ان الاضطرابات في تخفيف الدارة ، التداخل او الضجيج ، وحدود الطاقة الممكن استخدامها ، كل ذلك سيزيد في صعوبة استخدام عدة قيم للتيار .

عرف نيكويست ، بالعودة الى السرعة التي يمكن ارسال الاشارات ونقها ، سرعة الخط على انها نصف عدد مركبات الاشارة (نقاط ، فواصل ، قيم تيار) التي يمكن ارسالها في الثانية . سنجد ان هذا التعريف اكثر ملائمة على وجه التخصيص لاسباب لم يوضحها نيكويست في بحثه الاول .

كان من المعتاد ارسال الاشارات الهاتفية والبرقية عبر نفس الاسلاك خلال الفترة التي قام عندها نيكويست بابحاثه يستخدم الهاتف تواترات اعلى من ١٥ هـ . ف . ث ، بينما يمكن تنفيذ الارسال البرقي بواسطة اشارات ذات تواترات اخفض . اوضح نيكويست كيفية تشكيل الاشارات البرقية بحيث لا يكون لها مركبات جيبيية بتواترات عالية للدرجة يمكن معها سماعها كموجة متداخلة عبر الهواتف المربوطة الى نفس الخط . وذهب نيكويست ابعد من ذلك بملاحظته ان سرعة الخط وبالتالي سرعة الارسال تتناسب مع عرض او امتداد مجال او حزام التواترات المستعملة في البرق ، وتلغو الآن في مجال التواترات هذا بعرض حزام الدارة او الاشارة .

برهن نيكويست اخيرا بتحليل صنفه معين من الاشارات البرقية ، ان هذه الاشارة كانت تحتوي في كل الاوقات على مركبة جيبيية مستقرة ذات سعة ثابتة . لم تكن هذه المركبة بذات فائدة لدى المستقبل ، على الرغم من كونها جزءا من الطاقة المرسلة المستخدمة ، اذ كان ممكنا التنبؤ باضطراباتها الدائمة المتواترة وبالتالي تجهيزها عند المستقبل بدلا من ارسالها عبر الدارة . اشار نيكويست الى مركبة الاشارة هذه العديمة الفائدة وذكر انها لا تنقل اي معلومة مفسرة واسماها لذلك فائضة ، وهو مصطلح سنواجهه فيما بعد .

تابع نيكويست دراسة مشاكل البرق ونشر عام ١٩٢٨ بحثا هاما آخر بعنوان : ( جوانب هامة من نظرية الارسال البرقي ) اثبت فيه عددا من النقاط الهامة . بين نيكويست انه اذا ارسلنا عددا من قيم التيار المختلفة مساويا ٢ ن في الثانية ، فان المركبات الجيبية للاشارة التي تتجاوز تواترها القيمة ن هي مركبات فائضة ، بمعنى انه لا ضرورة لها اطلاقا في استنتاج ترتيب قيم التيارات المرسله من خلال الاشارة المستقبلية . شرح نيكويست بعد ذلك كيفية تكوين اشارة لا تحتوي تواترات حول القيمة ن ه ف ث والتي يمكن للمستقبل بواسطتها استنتاج قيم التيار المرسله كان هذا البحث الثاني لنيكويست اكثر غنى بالتفاصيل والكميات وادق في نفس الوقت بالمقارنة مع بحثه الاول . يشكل هذان البحثان المادة الاكثر اهمية المتضمنة في نظرية الاتصالات .

كان ذهن ر. ف. ل. هارتلي منشغلا في نفس الوقت بالابعاد الفلسفية لارسال المعلومات ، وهازلتي هو مخترع الهزاز المعروف باسمه هزاز هارتلي . وقد لخص تأملاته في بحث نشره عام ١٩٢٨ بعنوان ( ارسال المعلومات ) .

لقد كان لهارتلي طريقة مشوقة في صياغة مسألة الاتصالات ، وهي واحدة من طرائق وضع القضايا بالشكل المباشر والواضح خاصة ثوب البدهية الذي تبدو به عند عرضها ولكنها وعلى الرغم من ذلك تحتاج لسنوات حتى تتنامى النظرة الشاقبة التي تؤهل احدا ما لبسطها رأى هارتلي المرسل وقد جهز بمجموعة من الرموز ( احرف الابدعية مثلا ) يمكنه انتقاء ما شاء منها بشكل عقلي وارسالها رمزا بعد رمز مولدا بذلك سلسلة من الرموز ، ولاحظ ان حدثا تصادفيا كدرجة عدد من الكرات في مجموعة من الجيوب يمكنه بشكل مماثل لتوليد هذه السلسلة . عرف بعد ذلك المعلوماتية في الرسالة ورمز لها بالحرف ه ، ووافق تعريفه تساوي ه لوغاريتم عدد كل الاشكال المختلفة للسلسلة التي كان يمكن اختيارها ، وبرهن ان : ه = ل لع س ، حيث ل هو عدد الرموز المكونة للسلسلة ، و س عدد الرموز في المجموعة التي يتم انتقاء الرموز المكونة للسلسلة منها .

بعد ما قدمناه مقبولا في ضوء معارفنا المعاصرة عن نظرية المعلومات اذا تم انتقاء الرموز المتتالية بشكل مستقل وكانت رموز المجموعة متكافئة في احتمال انتقائها . وكل ما يلزمنا في هذه الحالة ان نلاحظ كما في السابق ان لوغاريتم عدد الرموز  $S$  أي  $\log S$  يساوي عدد الخيارات المستقلة للصفر أو الواحد التي يمكن تمثيلها أو إرسالها في وقت واحد ولعله أمر منطقي أن تساوي سرعة إرسال المعلومات جداء سرعة إرسال الإشارات في الثانية :  $L$  وعدد الخيارات المستقلة للصفر أو الواحد المحمولة في كل إشارة .

ذهب هارتلي أبعد من ذلك بتناوله موضوع ترميز الرموز الأولية ( أحرف الأبجدية مثلا ) بدلالة الرموز الثنائية ( مثلا سلاسل النقاط والفراغات والخطوط وفق ترميز مورس ) ، وبرهن أن البث الأسرع للرسائل يتطلب أن تكون أطوال الرموز الثنائية ( تمثيل مورس الرمزي ) محكومة بقيود اختيار الرموز ( مثلا حقيقة أن الحرف  $E$  في اللغة الانكليزية أكثر تواترا وبالتالي أكثر اختيارا من الحرف  $Z$  ) . كنا قد أوضحنا أن مورس نفسه قد تفهم هذا الأمر إلا أن هارتلي وضعه في صيغة سهلة المنال سيما الطرائق الرياضية وفتح ذلك الباب على مصراعيه أمام أبحاث أخرى تالية . اقترح هارتلي خطة لتطبيق هذه الاعتبارات على الإشارات المستمرة كإشارات الهاتف أو إشارات الصور .

اثبت هارتلي أخيراً وبما يتلاءم مع نيكويست أن كمية المعلومات الممكن إرسالها تتناسب مع جداء عرض الحزام في وقت الإرسال . إلا أن ذلك يضعنا في حيرة من عدد قيم التيارات المسموحة والتي لها أهميتها أعلى سرعة الإرسال . كيف يمكن أن نرقمها .

مرت نظرية الاتصالات بفترة طويلة من الاسترخاء والراحة بعد نيكويست وهارتلي . إذ انشغل العاملون فيها بدراسة وبناء أنظمة اتصالات متخصصة . وتطور هذا الفن إلى أشكال معقدة فعلا خلال

الحرب العالمية الثانية . لقد تم استيعاب انظمة واجهزة اتصالات جديدة على حساب قصور كبير في صياغة المبادئ الفلسفية .

كان امراً هاماً اثناء الحرب معرفة مسارات الطائرات من خلال معلومات رادارية غير دقيقة يشوبها الضجيج ، وذلك لتسهيل اسقاط تلك الطائرات . ودفع هذا بدوره الى السطح قضية اخرى : ماذا لو مثل تيار كهربائي متغير المعلومات الخاصة بموقع طائرة ولكن قد اضيف اليه تيار شائب آخر لا معنى له اي ضجيج . يمكن ان تكون التواترات الاكثر ورودا في الاشارة مختلفة عن التواترات الاكثر ورودا في الضجيج ، عندها يكون من المرغوب فيه تمرير الاشارة والضجيج المضاف اليها في دائرة كهربائية او مرشح تضعف بنتيجته التواترات الواردة في الضجيج بينما لا تتأثر تلك الواردة في الاشارة . يمرر بعد ذلك التيار الكهربائي الناتج في دارات اخرى في محاولة لمعرفة ماذا يمكن ان تكون عليه الاشارة الاصلية من دون ضجيج بعد ثوان قليلة من اللحظة الراهنة . ماذا يمكن ان يكون ذلك النوع من تركيب الدارات الكهربائية الذي سيسمح باحسن تنبؤ عن قيمة الاشارة الحقيقية بعد ثوان في المستقبل اعتبارا من الاشارة الحالية المشوبة بالضجيج .

نتناول في هذه المسألة اساساً مجموعة كاملة من الاشارات الممكنة ( مسارات للطائرة ) وليس اشارة واحدة وهكذا فليس في مقدورنا ان نحدد مقدماً أي الاشارات تهمننا ، والاسوا من ذلك اننا نتعامل مع ضجيج لا يمكن التنبؤ به .

لقد حل هذه المشكلة في الاتحاد السوفيتي العالم كولوموغروف ، بينما حلها في امريكا وبشكل منفصل العالم نوربرت وينر . كان وينر رياضياً اهلته خلفيته لمعالجة هذا النوع من المسائل واكمل اثناء الحرب وثيقة دعت بالخطر الاصفر لما سببته من صدام لدارسيها حل فيها المسألة الصعبة بشكل كامل .

شهدت فترتا الحرب وما بعدها انشغال رياضي آخر هو كلود .  
اي شانون بالحالة العامة لمسألة الاتصالات بدأ شانون باعتبار  
حسنة انظمة الاتصالات الحديثة وسعى لايجد معيار اساسي لمقارنة  
ميزاتها . نشر شانون عام ١٩٤٨ . بحثا في جزئين يعتبر القاعدة  
الاساسية لنظرية الاتصالات المعاصرة ، ونشر واينر في نفس العام  
كتابه ( السيبرنتيك ) والذي يعرض للاتصالات والتحكم .

يتناول شانون وواينر على حد سواء مشكلة الاحاطة بأي اشارة  
منتقاة من زمرة او مجموعة من الرموز الممكنة وليس مشكلة اشارة  
واحدة بحد ذاتها . لقد حدث تبادل حر للافكار بين مختلف العاملين في  
المعلوماتية قبل نشر بحث شانون وكتاب واينر ، حيث تظهر افكار  
وعبارات متشابهة في المرجعين ، الا ان تفسير شانون يبقى مع ذلك  
وحيدا من نوعه .

اربط اسم واينر مع مهمة استخلاص اشارات مجموعة معينة من  
ضجيج معروف النوعية . سبق ان قدمنا آفغا مثالا عن ذلك . يتبع  
الطيار المعادي مسارا يختاره بنفسه ، وتضيف اجهزة رادارنا ضجيجا  
طبيعي المنشأ الى الاشارات الممثلة لموقع الطائرة . وهكذا يصبح لدينا  
مجموعة من الاشارات الممكنة ( المسارات المحتملة للطائرة ) الخارجة عن  
دائرة اختيارنا ممزوجة مع ضجيج هو بدوره ليس من اختيارنا وعلينا  
ان نصل الى التقدير الامثل لقيمة الاشارة الحالية او المستقبلية ( الموقع  
الحالي او التالي للطائرة ) وبصرف النظر عن الضجيج المتواجد .

اما اسم شانون فقد اقترن بمواضيع اخرى كترميز رسائل منتقاة  
من مجموعة معينة بحيث يمكن نقلها بوجود الضجيج بسرعة وبدقة وعلى  
سبيل المثال تفترض ان لدينا مصدرا للارسال هو نص باللغة الانكليزية  
لم نقم باختياره ، اضافة لدائرة كهربائية ككابل برق مشوب بالضجيج ،  
هو بدوره ليس من اختيارنا ايضا . الا ان المسألة التي عالجها شانون  
تسمح لنا اختيار طريقة ترميز الرسالة باشارة كهربائية وكم هي القيم



المختلفة للتيار الكهربائي التي سنسمح بها مثلاً وما هو عدد ما سنرسله منها في كل ثانية . ليست المسألة اذن هي معرفة طريقة معالجة الإشارة والضجيج المضاف اليها بهدف الوصول الى افضل تقدير للإشارة ، بل هي تحديد نوعية الإشارة المزمع ارسالها لتحقيق ايصال امثل للرسائل التي هي من نمط معين عبر نوع محدد من الدارات التي يشوبها الضجيج .

تشكل قضية الترميز الفعال هذه مع نتائجها المادة الرئيسية لنظرية المعلومات حيث تعتبر مجموعة من الرسائل ، ويعكس البحث روح اعمال كل من كولوموغروف ، واينر موريس ، وهارتلي .

لعله من غير المجدي ان نحاول هنا مراجعة اعمال شانون ، سيما وان هذا الكتاب برمته يدور حول هذه الاعمال وسنرى فيما بعد ان هذه الاعمال تلقي اضاءاً كاشفة على المشاكل التي اثارها نيكويست وهارتلي وتذهب بعيداً وراء تلك المشاكل<sup>١٠</sup>.

يجب ان نذكر اسمين آخرين عند استعراضنا لنظرية المعلومات نشر دينيس غابور عام ١٩٤٦ بحثاً بعنوان نظرية الاتصالات ، ومهما كان من ايهاء هذا العنوان فقد فات البحث تضمين الضجيج الذي يقع في القلب من نظرية الاتصالات المعاصرة . شهد عام ١٩٤٩ بحثاً آخر لتال بعنوان الحدود النظرية لسرعة ارسال المعلومات ، وكان هذا البحث موانياً لعمل شانون وبشكل جزئي .

لقد انطوى جوهر هذا الفصل على حقيقة مفادها ان نظرية الاتصالات العامة التي قدمها لنا شانون قد نمت وترعرعت من دراسة المسائل المتخصصة للاتصالات الكهربائية . واجه مورس مشكلة تمثيل الاحرف الابجدية بنبضات كهربائية طويلة او قصيرة تتخللها فواصل لا نبض فيها - أي بخطوط ونقاط وفراغات البرق المعهودة . لقد اختار وبشكل صائب تمثيل الاحرف المتواترة بتراكيب قصيرة من الخطوط والنقاط والاحرف النادرة بتراكيب اطول ، وكان هذا الخيار الخطوط الاولى في الترميز الفعال للرسائل ، وهو ركن اساسي من نظرية الاتصالات .

استخدام تلاميذ مورش شدات واتجاهات مختلفة لدفق التيار الكهربائي بهدف إعطاء المرسل فرص أكثر لانتقاء الإشارات بالمقارنة مع الخيارين التقليديين : إرسال أو توقف . زاد ذلك من عدد الاحرف المرسله في واحدة الزمن ولكنه رفع من حساسية الإشارة لاي اضطراب كهربائي غير مرغوب فيه مما يسمى بالضجيج كذلك قلل من امكانات الدارات للاستجابة السريعة في حالات التغيرات السريعة للتيار .

برزت الحاجة لتقييم الميزات النسبية لعدد متنوع من الإشارات البرقية ، وكان لا بد من أداة رياضية لتحقيق ذلك . وليس غريباً أن يكون تحليل فورييه هو الاداة ، إذ بواسطة ذلك التحليل يمكن تمثيل اية إشارة كمجموع امواج جيبية ذات تواترات مختلفة .

إن معظم دارات الاتصالات من النوع الخفي ويعني ذلك أن تواجد عدد من الإشارات في نفس الدارة لا يؤدي لاي تدخل أو تبادل للتأثير بينها . ويمكننا أن نبرهنه إن اثر الدارة الخطية على الموجة الجيبية ينحصر باضعافها أو تخفيفها وتأخير زمن وصولها هذا على الرغم من حقيقة أنه حتى الدارات الخطية قد تفيد في أشكال معظم الأمواج . وهكذا فعندما تمثل موجة معقدة كمجموع امواج جيبية بتواترات مختلفة، يمكن اجراء حساب بسيط لاثر الدارة الخطية على كل مركبة جيبية بشكل منفصل وبجمع المركبات الجيبية المخففة أو المضعفة نصل الى قيمة الموجة المستقبلية . المقابلة للموجة الاصلية المعقدة .

اثبت نيكويست أن عدد قيم التيار المختلفة التي يمكن إرسالها عبر دائرة معينة في ثانية يساوي ضعف المجال الكلي أو حزمة التواترات المستخدمة . وهكذا يتناسب عدد الاحرف المرسله مع عرض الحزمة اثبت كل من هارثلي ونيكويست أيضا أن سرعة نقل الأحرف تتناسب مع لوغاريتم عدد قيم التيار المستخدمة .

احتاجت النظرية المتكاملة للاتصالات أدوات رياضية أخرى وأفكر

محدثة . وارتبط ذلك الجانب من النظرية بأعمال كولوموغروف وواينر اللذين درسا مشكلة إشارة مجهولة من نوع معين تشوشها إضافات من الضجيج . كيف يمكن ترشيح الإشارة على الرغم من وجود الضجيج ، هكذا ما أجاب عنه بالتفصيل كل من كولوموغروف وواينر .

تختلف المسألة التي نذر شانون نفسه لها عما تقدم . نفرض أن لدينا مصدر إرسال ينتج رسائل من نوع معين كالتصوص الإنكليزية مثلا . ونضيف الى ذلك فرضاً آخر مفاده أن بحوزتنا قناة اتصال ذات مواصفات محددة ولكنها مشوبة بالضجيج . فكيف يمكننا أن نمثل أو نرمز الرسائل من المصدر المرسل باستخدام الإشارات الكهربائية للحصول على أسرع إرسال ممكن عبر القناة المعتبرة ، وبشكل عملي ما هي السرعة التي نتمكن بواسطتها من إرسال رسالة معينة عبر قناة معطاة بدون أخطاء . هذا هو عرض تقريبي وعام للمسألة التي طرحها شانون على نفسه ثم قام بحلها .





## الفصل الثالث

### نموذج رياضي

إن النظرية الرياضية التي تحاول تفسير العالم والتنبؤ بأحداثه تعتبر على الدوام نموذجاً مبسطاً لهذا العالم ، لا تدخل في صلب تشكيله إلا الأشياء التي لها صلة بالظاهرة المدروسة .

وهكذا تتركب الكواكب من مواد مختلفة صلبة ، سائلة ، وغازية في ضغوط ودرجات حرارة متباينة . تعكس الأقسام من تلك المواد المعرضة لنور الشمس نسباً من الألوان المختلفة للضوء الساقط عليها وهذا يؤدي للملاحظات بقعاً لونية مختلفة عندما نقوم برصد تلك الكواكب . إلا أن الفلكي الرياضي لا يحتاج كل ذلك عند حسابه لمدارات الكواكب حول الشمس وكل ما يأخذه بالاعتبار في هذه الحالة كتلة الشمس والكوكب المعتبر وبعد الكوكب عن الشمس ، وأخيراً سرعة الكوكب ووجهة حركته عند لحظة ابتدائية معينة . وإذا رغب الفلكي بحساب أكثر دقة يدخل في حسابه كتل وحركات الكواكب التي تفرض أثراً ثقالياً على الكوكب المدروس .

لا يعني ذلك أن الفلكيين غير معنيين بالأحوال الأخرى للكواكب وكذلك بالنجوم والسدم ، إلا أن النقطة الجوهرية في الموضوع أنهم لا يحتاجون هذه الأمور لدى حسابهم مدارات الكواكب . تبرز جماليات وقوة النظرية الرياضية والنموذج الرياضي في الفصل بين ما هو هام وما هو أقل أهمية ، وهكذا يمكن الربط بين بعض الظواهر الملاحظة دون الحاجة لفهم الطبيعة بأكملها والكون بمجمل سلوكه .

تختلف النماذج الرياضية بدرجات دقتها أو امكانات تطبيقها . وهكذا يمكننا حسب مدارات الكواكب بدقة عالية باعتبارها اجساماً صلبة ، على الرغم من انه لا توجد أجسام صلبة في الواقع . ومن جهة اخرى لا يمكن فهم الحركة المديدة لقمر الارض إلا إذا اخذنا بالحسبان حركة كتل المياه على سطح الأرض أي حوادث المد والجزر . لذا ففي دراسة حركة القمر لا يمكن اعتبار الأرض جسماً صلباً .

ندرس وبشكل مماثل في نظرية الشبكات الخصائص الكهربائية لتوصيلات المحرّضات المثالية والكثفات والمقاومات والتي تتصف بخصائص رياضية بسيطة معينة . اما المركبات الحقيقية المستخدمة بشكل فعلي في الدارات المختلفة كالراديو والتلفزيون والهاتف وغيرها فهي تقرب الى هذا الحد أو ذاك من الموصفات الرياضية للعناصر المثالية المعتبرة في نظرية الشبكات وهي المحرّضات ، المكثفات والمقاومات ويختلف مقدار الفرق حسب الحالة ، اذ يكون ضئيلاً ويمكن اهماله في دائرة ما ، بينما يجب أخذه بالاعتبار في دائرة أخرى بمزيد من الحسابات المعمّقة .

يمكن أن يكون النموذج الرياضي بالطبع تقريبياً ، وحتى تمثيلاً غير صحيح للحوادث في العالم الواقعي . لذا وقع رجال الاقتصاد الأوائل الانانيون المدفوعون بحب الربح في مطب مجانبة النماذج الرياضية لأن سلوك الاقتصاديين لم يكن مناسباً وكذلك كان فاشلاً في تفسير العلاقات الاقتصادية في العالم والناس الموجودين فيه .

لقد ضربنا مدارات الكواكب وسلوك الشبكات امثلة عن نظم مثالية حتمية يمكن التنبؤ بسلوكها المستقبلي تماماً كما نتوقع من الآلات ، إذ يمكن للفلكيين حساب مواقع الكواكب لآلاف مقبلة من السنين ، كذلك تطلعنا نظرية الشبكات على كل السلوك اللاحق لشبكة كهربائية عند انثارها بإشارة كهربائية معينة .

تسحب خاصة الحتمية حتى على الاقتصاديين ، اذ ان الاقتصادي سيحركه على الدوام دافع الربح . إلا انه اذا قام مرة برمي احجار النرد ظناً منه انه المفضل عندها ، فسيصبح مستقبله الاقتصادي على كف عفريت ولا يمكن التنبؤ به فحتى احجار النرد قد تفقد تفضيلها وتتركه عندئذ في حالة خسارة كاملة .

يمكننا على الرغم من ذلك تصميم نماذج رياضية للحوادث العشوائية كسحب عدد ما ، ثلاثة مثلاً ، من الكرات البيضاء أو السوداء من علبة تحتوي على العدد نفسه من كلا النوعين . يظلمنا مثل هذا النموذج ، في واقع الامر ، على انه بعد عدد كافٍ من المحاولات تكون قد سحبنا كرات بيضاء وبشكل متتالٍ لمدة تساوي  $\frac{1}{2}$  الوقت ، ومزيج من كرتين بيضاوين واخرى سوداء لمدة  $\frac{2}{3}$  الوقت ، ومزيج آخر من كرتين سوداوين واخرى بيضاء لمدة  $\frac{3}{4}$  الوقت ، واخيراً كرات سوداء وبشكل مستمر خلال  $\frac{1}{2}$  الوقت . يفيدنا هذا النموذج ايضاً في معرفة درجات الانحرافات من هذه الأرقام بعد عدد ما من عمليات السحب .

تؤكد الخبرة العملية ان السلوك الإنساني ليس حتمياً بالدرجة التي يسمى اليها الاقتصادي وهو في نفس الوقت ليس عشوائياً كرمي احجار النرد أو سحب الكرات من مزيج من الكرات السوداء والبيضاء . إلا انه يجب علينا ان نوضح ان نموذجاً حتمياً لن يذهب بنا بعيداً في تفسير مختلف ظواهر السلوك الإنساني كالاتصالات الإنسانية مثلاً ، بينما يمكن للنموذج العشوائي أو الإحصائي فعل ذلك .

نعلم جميعاً ان جداول معدلات الوفيات المستخدمة من قبل شركات التأمين تعطي تنبؤات معقولة فيما يتعلق بنسبة الوفيات المقبلة في مجموعة تضم عدداً كبيراً من المسنين ؛ هذا على الرغم من صعوبة التنبؤ بموت شخص معين وهكذا يمكننا النموذج الإحصائي من فهم السلوك الإنساني بل وحتى من اجراء بعض التنبؤات الخاصة بذلك السلوك تماماً كما نتنبأ على المدى البعيد وبشكل وسطي بعدد المرات التي سنسحب بها ثلاثة كرات سوداء بمحض المصادفة من مزيج متساوٍ من انكرات البيضاء والسوداء .

قد يعترض البعض بحجة ان جداول معدلات الوفيات تغطي التنبؤات الخاصة بمجموعات من الناس ولا تغطي التنبؤات الخاصة بالأفراد ، إلا ان الخبرة تعلمنا ان باستطاعتنا اجراء التنبؤات الخاصة بالأفراد على قدم المساواة مع التنبؤات الخاصة بالمجموعات . وهكذا إذا عددنا تواتر استخدام الحرف E في النصوص الإنكليزية نجد ان نسبة مرات وروده تساوي ١٣ ٪ بالمقارنة مع الأحرف الأخرى ، يقابل هذا الرقم في حالة الحرف W ٢ ٪ فقط . ولكننا نجد أيضاً نفس نسب الورد للحرفين W, E في نص كتبه أي شخص من الأشخاص . يمكننا ان نتنبأ استناداً الى ذلك شيء من الثقة انه إذا كتب أي منا رسالة طويلة جداً او كتاباً باللغة الإنكليزية فسيتواتر الحرف E بنسبة ١٣ ٪ فيما كتبه .

لا يحد إمكان التنبؤ بسلوك ما حريتنا أكثر مما تحددها أية مادة أخرى . لا يتوجب على أي منا اثناء الكتابة إيراد نفس النسب لكل الأحرف كما يوردها شخص آخر . لقد خرج كثيرون من الأشخاص المتميزين عن النموذج الشائع . قام ويليام . ف. فرايدمان المشهور بدراسة الأمور المستعمية ومؤلف كتاب ( حل رموز شكسبير ) بتزويدي بالأمثلة التالية :

كتب الشاعر الألماني غوتلوب بورمان ( ١٧٣٧ - ١٨٠٥ ) ١٣٠ بيت شعر تضمنت ٢٠٠٠٠ كلمة خلت جميعها من الحرف R وذهب هذا الشاعر الى أكثر من ذلك بحذفه الحرف R من كل الجمل التي استعملها للحوار في حياته العادية خلال ال ١٧ سنة الأخيرة من حياته .

نشر القاص البرتغالي الوتسو الكلاهيرارا خمس قصص في لشبونة عام ١٦٤١ لم يستخدم فيها أحد الأحرف الصوتية . وقد أورد أمثلة مشابهة كل من الأشخاص التالية أسماؤهم : فرانسيسكونا فلريت ريبيرا ( ١٦٥٩ ) ، فرناندو جاسينتودي زوريتاهارو ( ١٦٥٤ ) ، واماويل لورانزو ليزارازو بربوزانا ( ١٦٥٤ ) .



نشر ارنست فنسنت رايت رواية من ٢٦٧ صفحة لم يستخدم فيها الحرف E مطلقا . ولئن كانت هذه الممارسات الإرادية تدل على عدم استحالة كسر سلاسل المألوف ، إلا أننا عندما نكتب فإنما نفضل الطريقة الاتباعية المتداولة ، وهكذا فعندما لا نرغب بالخروج عن طريقنا بهدف اثبات أن بالإمكان أن نفعل خلاف ما تقدم فإننا نورد الحرف E في كتابتنا الإنكليزية بنسبة ١٣ ٪ تماما بكل ما في آلة معينة من كفاءة أو كتطبيق قانون رياضي .

لا نستطيع الانتقال من هذه الفكرة الى الفكرة العاكسة المتضمنة أن بإمكان الآلة التي تزود فيها نفس المعدات كتابة نصوص إنكليزية إلا أن شأنون أوضح كيفية تقريب الكلمات والنصوص الإنكليزية بعمليات رياضية يمكن تنفيذها من قبل آلة معينة .

نفرض على سبيل المثال أن كل ما نستطيع فعله هو انتاج سلاسل من الاحرف والفراغات باحتمالات متساوية . ويمكن تنفيذ ذلك على الصعيد العملي بكتابة كل حرف على نفس العدد من البطاقات المتعائلة وكذلك تخصيص عدد مماثل من البطاقات دون كتابة لتمثيل الفراغ ، وأخيرا وضع الجميع في جعبة ثم سحب احداها واستخدام رمزها سواء اكان حرفا أم فراغا. ثم اعادته فخلط البطاقات من أخرى وسحب واحدة لاستخدام رمزها وهكذا . ينتج عن هذا التطبيق ما يلي :

١ - التقريب الصغري ( الرموز مستقلة ومتساوية الاحتمال )

XFOML RXIKHRJFFJUU ZLPWCEFWKCYJ  
FFJEYVKCSSGHYD QPAAMKBZAAACIBZLHJQD

يتواتر هنا حرفا الـ Z و W بكثرة ، بينما عدد الفراغات قليل وكذلك عدد مرات ورود الحرف E . يمكننا أن نقرب أكثر من اللغة الإنكليزية باختيار الاحرف بشكل مستقل عن بعضها البعض ولكن باختيار الحرف E مرات أكثر من اختيار الحرفين Z و W . وبنفذ ذلك بزيادة عدد البطاقات الخاصة بالحرف E واقلال البطاقات الخاصة

بالحرفين W الحرف ومن ثم تكرر نفس الطريقة السابقة في استخراج البطاقات واستخدام رموزها . ولما كان احتمال ان يكون أحد الحرف E هو ١٣ر . نضع في الجعبة ١٣ بطاقة خاصة بهذا الحرف وبالمثل نضع بطاقتين فقط للحرف W لان الاحتمال المقابل للحرف الاخير هو ٢ر . وهكذا بالنسبة لبقية الحرف . ندرج فيما يلي نتائج هذه التجربة والتي دعاها شاتون بالتقريب الاول لنصوص اللغة الانكليزية .

٢ - التقريب الاول ( الرموز مستقلة ولكن تساوي تواتراتها مايرد في النصوص الانكليزية ) .

OCRO HLI RGWR NMIELWIS EU LL NIBNESEBAYI TH  
EEI ALHENHITIPA OOBITIVA NAIH BRL

لا نجد في النصوص الانكليزية اي زوج من الحرف يبدأ بالحرف Q الا الزوج QU ، وهكذا فاحتمال ان تصادف زوجاً مثل QX هو صفر وكذا احتمال مصادفة الزوج QZ وعلى الرغم من كون احتمال ورود الزوج QU اكبر من الصفر فهو احتمال صغير للغاية ، في حين ان احتمال الزوج OR هو ٣٧٪ والزوج TH ١٪ والزوج WE ٦ر . تحمل هذه الاحتمالات المعنى التالي . اذا احتوى نص مكتوب على عدد من الحرف مساوي مثلاً ١٠٠٠١ حرفاً فان في هذا النص ١٠٠٠ زوج متتال من الحرف وهي : الحروف الاول والثاني ، الثاني والثالث ، الثالث والرابع ، وهكذا حتى الزوج المكون من الحرف ما قبل الاخير والحرف الاخير . نعتبر الزوج T H بونعد مرات وروده ، حيث يمكن ان يكون العدد الناتج ( ٣٧٠ ) . فاذا قسمنا عدد مرات ورود الزوج TH والذي فرضناه مساوياً ٣٧٠ على عدد كل الأزواج الموجودة والمساوي في مثالنا ١٠٠٠٠ لحصلنا على عدد هو ٣٧٪ وهو احتمال ان نحصل على الزوج TH اذا رفعنا من ذلك النص وبشكل عشوائي زوجاً ما من الحرف .

اعد بعض المحللين البارعين للشفيرات جداولاً تتضمن احتمالات

مماثلة لورود أزواج مختلفة من الأحرف في نصوص اللغة الانكليزية .  
نفرض أن لدينا ٢٧ جعبة ، نخصص ٢٦ منها للأزواج التي تبدأ بكل  
حرف من حروف اللغة الانكليزية ، بينما الجعبة الأخيرة نخصصها للأزواج  
التي تبدأ بفراغات . نضع بعد ذلك عدداً كبيراً من الأزواج في الجعب  
بشكل يناسب احتمالات تلك الأزواج ، فمثلاً من أصل ١٠٠٠ ( زوج ،  
نضع ٣٧ زوج من نوع TH ، ١٠ من نوع WE وهكذا .

دعونا نتوقف للحظة في محاولة فهم معنى هذه الجعب المليئة بالأزواج  
بدلالة عمليات التعداد الأصلية التي أدت لتقويم احتمالات تلك الأزواج .

يمكننا متابعة كل ورود للحرف T في النص إذا نحن جردناه حرفاً  
بحرف ، وهكذا سيكون عدد الأزواج البادئة بالحرف T ، والتي نضعها  
جميعاً في جعبة واحدة ، مساوٍ لعدد مرات ورود الحرف T . وتساوي  
نسبة عدد هذه الأزواج الى عدد كل الأزواج الواردة في النص ، احتمال  
ورود الحرف T في النص أي ١٠ ٪ ، نرمز لهذا الاحتمال بالرمز :  
$$P(T) = ١٠ \%$$

نلاحظ هنا أن هذه النسبة هي أيضاً نسبة الأزواج المنتهية بالحرف  
T كما هي نسبة الأزواج البادئة به .

وبالعودة الى نصنا المثال المحتوي على ١٠٠٠١ حرفاً و ١٠٠٠٠  
زوجاً ، فإن عدد مرات ورود الزوج TH هو ٣٧٠ ، وهكذا فاحتمال  
هو ٣٧ ٪ ، نرمز لهذا الاحتمال بالرمز TH مصادفة الزوج  
ح (H,T) ويكون :  $P(H,T) = ٣٧ \%$

نجد حسب مثالنا أن الأزواج البادئة بالحرف T والموضوعة في  
جعبة واحدة تساوي ١٠٠٠ زوج لأن احتمالها هو ١٠ ٪ ، ومن أصل  
هذه الأزواج يوجد ٣٧٠ زوج من نوع TH . وهكذا يكون نسبة الأزواج  
TH مساوية لـ :  $\frac{٣٧٠}{١٠٠٠} = ٣٧ \%$  نقول حسب ما تقدم أن احتمال

كون الزوج البادئ بالحرف T ( وهو الاحتمال الذي هو الزوج TH  
نرمز له بالرمز  $P_T(H)$  ) يساوي :  $P_T(H) = ٣٧ \%$

يدعى هذا بالاحتمال المشروط بكون الحرف التالي للحرف T هو الحرف H .

يمكننا ان نستخدم هذه الاحتمالات المثلة بشكل كافٍ بعدد الأزواج المختلفة في الجعب المختلفة لانشاء نص انكليزي تتواتر فيه الاحرف والأزواج تواترها في النصوص الطبيعية . نبين فيما يلي طريقة انشاء هذا النص : نسحب من جعبة ما زوجاً ونكتب حرفيه ثم نسحب زوجاً آخر من الجعبة المخصصة للأزواج البادئة بالحرف الثاني من الزوج الاول المسحوب ونكتب الحرف الثاني من هذا الزوج الثاني المسحوب . نسحب الآن زوجاً ثالثاً من الجعبة المخصصة للأزواج البادئة بالحرف الثاني من الزوج الثاني المسحوب ونكتب الحرف الثاني من هذا الزوج الثالث المسحوب ، ونستمر بهذه العملية وفق نفس الوتيرة ، كما نعامل الفراغ كالحرف تماماً . هناك احتمال خاص ان يلي الفراغ أحد الاحرف ( انتهاء كلمة ما ) وكذا احتمال خاص آخر ان يلي أحد الاحرف فراغاً ما ( بدء كلمة ما ) ..

انشأ شانون مادامه بالتقريب الثاني للنصوص الانكليزية لدى هذه الطريقة .

٣ - التقريب الثاني : انشاء الأزواج كما في النصوص الطبيعية الانكليزية {

ON IE ANTISOUTINYS ARE T INCTORE ST BE S  
DEAMY ACHIN ID ILONASIVE TUCCOWE AT  
TEASONARE FUSO TIZIN ADY TOBE  
SEACE CTISBE

أبداع بعض الباحثين فكرة استقصاء ورود التراكيب الثلاثية الاحرف وحسبوا بالمثل احتمالاتها . استخدم شانون هذه الاحتمالات أيضاً لانشاء مادامه بالتقريب الثالث للنصوص الانكليزية .

٤ - التقريب الثالث ( انشاء التراكيب الثلاثية كما في النصوص الطبيعية الانكليزية )

IN NO IST LAT WHEY CRATICT FROURE BIRS  
GROCID PONDENOME OF DEMONSTURES OF THE  
REPTAGIN IS REGOACTONA OF CRE

نلاحظ لدى العودة الى تقريبات شانون الاربعة اعلاه تشابهاً مطرداً مع النصوص الانكليزية الطبيعية . لا نجد في التقريب الاول وهو التقريب الذي يأخذ تواترات الاحرف بعين اعتبار ، التراكيبين OORO و NAH وهما يشبهان نوعاً ما الكلمات الانكليزية . ولدى الانتقال الى التقريب الثاني الذي يأخذ تواترات الأزواج بعين الاعتبار نجد ان كل التراكيب فيه يمكن نطقها ، كما ان التراكيب ANDY AT BE ARE ON ترد في اللغة الانكليزية . واخيراً في التقريب الثالث الذي يعتبر تواتر ورود التراكيب الثلاثية نجد ثمانية كلمات من اللغة الانكليزية ، وعدة كلمات اخرى يطابق منطوقها منطوق الكلمات الانكليزية مثل :

DEMONSTURES PONDENOME GROCID

قام ج. ت. جيلبود بعمل مشابه ولكن في اللغة اللاتينية بدلاً من الانكليزية واستخدم التراكيب الثلاثية وتوصل الى نتائج مماثلة تقتطف منها التراكيب التالية :

IBUS CENT IPITIA VETIS IPSE CUM  
VIVIVS SE ACETITI DEDENTUR

ونجد من بين هذه التراكيب الكلمات اللاتينية الاصلية التالية :

IPSE CUM SE

يتضح من هذه الامثلة اننا اذا اعطينا الآلة احصائيات حول لغة معينة وكذلك احتمالات ايجاد حرف معين او زمر مؤلفة من حرف او اثنين

أو ثلاثة أو أكثر ، باعطاء الآلة أيضاً امكانية شبيهة بسحب كرة من جعبة أو قذف قطعة نقد أو اختيار رقم عشوائي فيمكننا جعل الآلة تنتج نصوصاً أكثر قرباً من النصوص الطبيعية للغة المعتمدة . وكلما كانت المعلومات المعطاة للآلة أكثر كمالات كانت النصوص المصاغة من قبلها شبيهة بالنصوص الطبيعية سواء بمبناها الاحصائي أو بالنسبة للعين الانسانية .

إذا جعلنا الآلة تختار زمراً من ثلاثة احرف بالاستناد الى احتمالاتها فان اي تركيب ثلاثي تقدمه الآلة سيكون كلمة معروفة من اللغة أو جزءاً من كلمة معروفة واي تركيب مثنى تقدمه في هذه الحالة سيكون كلمة معروفة ان الآلة على كل حال أكثر انطلافاً من الانسان الذي يحدد نفسه عادة بكتابة سلاسل من الاحرف منتقاة بحيث تحمل معاني معينة وهكذا يتجاوز الكثير من التركيبات التي اوردناها في التقريبات السابقة . يمكن بالطبع للانسان ومن حيث المبدأ ان يكتب مثل هذه التراكيب الا انه لا يفعل ذلك عادة .

يمكننا تحرير الآلة من عيب تقديم تراكيب الاحرف غير المعروفة في اللغة بجعلها ، اي الآلة ، تختار من بين التراكيب التي يحتوي كل منها على عدد من الاحرف يساوي ما تحويه أطول كلمة معروفة في اللغة . نستطيع تحقيق الهدف ذاته بطريقة أبسط اذا جهزنا الآلة بالكلمات عوضاً عن الاحرف وتراكيبها ثم طلبنا منها تقديم الكلمات وفق احتمالات مناسبة .

قدم شانون مثلاً تم اختيار الكلمات فيه بشكل مستقل ولكن بحسب احتمالات ورودها في النصوص الانكليزية ، مثلاً ترد كلمات THE AND MAN وغيرها بنفس تواتر ورودها في النصوص الطبيعية الانكليزية . ولتحقيق هذا المثال نختار نصاً ما ، ثم نكتب كل كلمة وارادة فيه وبشكل منفصل على بطاقة ، نضع البطاقات في جعبة ونخلطها ثم نبداً بسحب البطاقات واحدة تلو الاخرى ونكتب الكلمات المقابلة وفق ترتيب السحب . يسمى شانون هذه العملية بتقريب الكلمات الاول . وقد حصل في مثال عالجه على ما يلي :

٥ - تقريب الكلمات الاول : تسحب الكلمات هنا بشكل مستقل ولكن وفق تواتراتها المناسبة .

REPRESENTING AND SPEEDILY IS AN GOOD APT  
OR CAN COME DIFFERENT NATURAL HERE HE  
THE A IN CAME THE TO ,OF TO EXPERT  
GRAY COME TO FURNISHES THE LINE  
MESSAGE HAD BE THYESE

لا توجد جداول لاحتمالات ورود أزواج الكلمات في اللغة الانكليزية ،  
الا ان شانون انشأ مقطعاً عشوائياً كانت فيه احتمالات ورود أزواج  
الكلمات مساوية لما يمكن ان تكون عليه في مقطع طبيعي . بدأ شانون  
باختيار زوج من الكلمات من رواية معينة وبشكل عشوائي ، ثم نسخ  
الكلمة الثابتة من هذا الزوج على ورقة منفصلة . بحث بعد ذلك في نفس  
الرواية عن الورد التالي للكلمة الثانية من الزوج الاول ، ونسخ الكلمة  
الواقعة بعد هذا الورد على الورقة المنفصلة ، ثم بحث عن الورد التالي  
لهذه الكلمة الاخيرة ونسخ الكلمة التالية لهذا الورد وهكذا . أدت هذه  
العملية بشانون الى ما اسماه تقريب الكلمات الثاني .

٦ - تقريب الكلمات الثاني : حيث احتمالات تتالي الكلمات صحيحة  
ولا تستخدم قواعد الانشاء ابعد من ذلك .

دعونا نتمعن النظر في كل ما وجدناه . ترد في النصوص اللغوية

THE HEAD AND IN FRONTAL ATTACK ON AN  
ENGLISH WRITER THAT THE CHARACTER OF  
THIS POINT IS THEREFORE ANOTHER METHOD  
FOR THE LETTERS THAT THE TIME OF WHO  
EVER TOLD THE PROBLEM FOR AN  
UNEXPECTED.

نلاحظ في هذا النص تشكيلات من الكلمات الانكليزية تشابه ، بل  
وقد تطابق أحيانا ، ما يرد في نص طبيعي .

دعونا نعمن النظر في كل ما وجدناه . ترد في النصوص اللغوية الحقيقية ، تلك النصوص التي نرسلها عبر لوحة جهاز البرق مثلاً ، حروف معينة بتواترات ثابتة تقريباً . تتكرر تراكيب الأحرف الثنائية والثلاثية والرابعة بتواترات ثابتة تقريباً أيضاً خاصة كلما ازداد طول النص المعتبر . كذا ترد الكلمات وأزواج الكلمات بتواترات ثابتة . وأخيراً يمكننا انتاج سلاسل من الكلمات أو الأحرف تمكس هذه المواصفات الاحصائية اذا جملنا - آلة مثلاً - تتصدى للامر باستخدام طرائق رياضية عشوائية .

لن نستطيع هذه الطريقة ، مهما طرأ عليها من تحسينات ، أن تنتج كل سلاسل الكلمات التي يمكن للإنسان أن يتفوه بها ؛ وأن دفعها حتى نهايتها القصوى لن يخرج بها عن تراكيب جمالية وردت سابقاً والآن لما حملت المعلومات الاحصائية التي قامت عليها أصلاً .. ومع ذلك فقد تشكل جملة لم تقل أبداً من قبل .

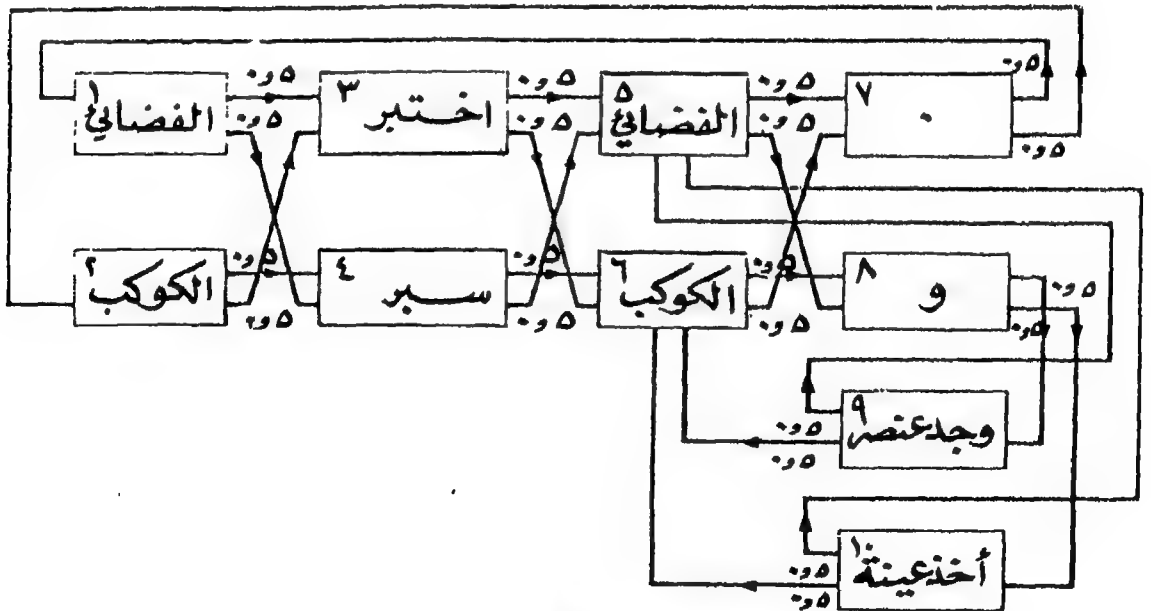
لا تقتصر أحكام اللغة على الأحرف والكلمات فقط ، بل تعداها الى اصناف من الكلمات وقواعد ربطها ، أي الى قواعد اللغة . يتوجب في هذا المعرض على اللغويين والمهندسين الذين يحاولون بناء آلات مترجمة أن يفحصوا في القواعد ، بحيث تتمكن الآلاتهم من ( توليف الكلمات في تشكيلات صحيحة من وجهة نظر القواعد ) حتى ولو لم ترد هذه التشكيلات في النصوص اللغوية سابقاً . وعلى الآلات أيضاً أن تتفهم معاني الكلمات الواردة في النص المترجم من سياق ذلك النص . أن هذه مشكلة كبيرة ومعقدة جداً . أما تحقيق آلة قادرة على انتاج تشكيلات لا نهاية لعددها من الجمل الصحيحة بالنسبة للقواعد ، ولكن غير المفيدة في أكثر الاحوال ، فهو أمر بسيط فعلاً .

يوضح الشكل ٣ - ١ آلة من هذا الطراز . يمثل كل مستطيل مرقم حالة من حالات هذه الآلة . تدعى هذه الآلة بالآلة منتهية الحالات ، لأن عدد مستطيلاتها أو حالاتها منته .



ينطلق من كل مستطيل عدد من الاسهم الى المستطيلات الاخرى ،  
يساوي هذا العدد في آلتنا الخاصة هذه اثنين ، اذ ينطلق سهمان فقط  
من كل مستطيل الى مستطيلين آخرين . كذلك فقد تم ارفاق كل سهم  
في هذه الآلة بالعدد ١ ويعني هذا العدد ن احتمال انتقال الآلة مثلا من  
الحالة ٢ الى ٣ هو ١ ، كذلك احتمال انتقالها من الحالة ٢ الى الحالة  
٤ هو ١ ايضا .

كيف نشغل هذه الآلة ؟ الامر بسيط فكل ما نحتاجه هو سلسلة من  
الخيارات العشوائية والتي يمكن الحصول عليها مثلا برمي قطعة نقد  
( مرة بعد مرة ، ونصطلح على ان ( الطرة ) تعني اتباع السهم العلوي  
بينما ( النقش ) يعني اتباع السهم السفلي ويفضي كل من السهمين الى  
حالة جديدة من حالات الآلة .. وعندما نبلغ حالة جديدة للآلة ننسخ  
الكلمة او الكلمات او الرموز الوارد في المستطيل المحدد ثم ( نرمي قطعة  
النقد مرة اخرى بهدف الانتقال الى حالة جديدة وهكذا .



الشكل ٢ - ١

إذا بدأنا على سبيل المثال في المستطيل ٧ وحصلنا بالقذف المتتالي  
لقطعة النقد على المتتالية : نقش - طرة - طرة - طرة - نقش - نقش -  
طرة - نقش - نقش - نقش - طرة - طرة - طرة - طرة - ، لانتهينا الى  
النص التالي :

الكوكب سبر الكوكب واخذ عينة الكوكب واخذ عينة الكوكب .  
الفضائي اختبر الفضائي .

يمكن لهذه العملية ان تستمر دون توقف منتجة جملا غير محدودة  
بالطول . يفضي الانتقاء العشوائي باستخدام جداول احتمالات خاصة  
بسلاسل من الرموز ( حروف وقراءات ) او الكلمات الى تراكيب مشابهة  
النصوص اللغوية ، كذلك تصل الى نفس النتيجة آلة متناهية الحالات  
مزودة بخيار عشوائي يمررها من حالة لاخرى . تسمى كلا العمليتين  
عملية عشوائية نظرا لانطوائها على عنصر العشوائية .

لقد تفحصنا عددا من خصائص اللغة الانكليزية وتبين لنا ان متوسط  
تواتر الحرف B ثلثت تقريبا في نص ما لكاتب معين ونصوص مغايرة  
لكتاب آخرين ، كذلك سحبنا بثبات التواترات على التراكيب الاعقد  
كالتوازي الاحرف . واخيرا تراكيب اشبه بالنصوص اللغوية باستخدام  
سلاسل من الخيارات العشوائية كسحب بطاقة من جعبة و قذف قطعة  
نقد وبلحظ الاحتمالات المناسبة اثناء العملية . وكانت احدى هذه الطرق  
استخدام الآلة المتناهية الحالات كتلك الموضحة في الشكل ٣ - ١ .

انصبحت مساعيها على بناء نموذج رياضي يمثل مصدرا للنصوص  
اللغوية توجب على هذا النموذج انتاج تراكيب اقل ما يمكن للنصوص  
اللغوية الطبيعية وكانت من القرب بدرجة جعلت مسألة ترميزها وارسالها  
مطابقة لحالة ترميز وارسال النص الفعلي ، كما توجب ان تعترف  
الخصائص الرياضية للنموذج بشكل يمكن من اثبات نظريات مفيدة تتعلق  
بترميز وارسال النصوص التي يقدمها ، وهي نفس الوقت قابلة التطبيق  
الى درجة مقبولة من التعريب في حالة النصوص الفعلية . ولعلها مبالغة ان  
نتصور ان انشاء النصوص اللغوية الفعلية يتلائم والدقة الرياضية من  
خلال عمل النموذج .

اعتمد شانون المصدر المستقر كنموذج رياضي لتمثيل انتاج النص. ( وكذلك الرسائل المنطوقة والمرئية ) . ولا بد لتفهم المصدر المستقر من دراسة المصدر الساكن اولا ، وهذه هي مهمتنا التالية .

يعكس مصطلح المصدر الساكن الفكرة العامة وراء هذا المصدر فلنتصور آلة تخيلية تنتج على الدوام بعد اقلعها سلسلة الاحرف :

$$A \quad B \quad C \quad D \quad E \quad F \quad G \quad H \quad I \quad J \quad K \quad L \quad M \quad N \quad O \quad P \quad Q \quad R \quad S \quad T \quad U \quad V \quad W \quad X \quad Y \quad Z$$

فيتضح ان ماسيلي من التاج هذه الآلة يطابق ما سبق لذا فانسب صفة يمكن ربطها بمصدر هذه الاحرف هي صفة السكون . يمكن ان نقابل المصدر السكوني هذا بمصدر آخر يقدم بعد اقلعه سلسلة الاحرف :

$$A \quad B \quad C \quad D \quad E \quad F \quad G \quad H \quad I \quad J \quad K \quad L \quad M \quad N \quad O \quad P \quad Q \quad R \quad S \quad T \quad U \quad V \quad W \quad X \quad Y \quad Z$$

يرداد هنا وعلى الدوام طول السلاسل الجزئية المكونة من حرفي A ، B ، C ، D ، E ، F ، G ، H ، I ، J ، K ، L ، M ، N ، O ، P ، Q ، R ، S ، T ، U ، V ، W ، X ، Y ، Z .

ان أي سلسلة من الاحرف يتم اختيارها بشكل عشوائي ووفق احتمالات محددة تشكل مصدرا ساكنا . سبق ان قدمت التقريبات في الامثلة ١ ، ٢ ، ٣ امثلة عن المصادر الساكنة لقد غدت الفكرة العامة للمصدر الساكن واضحة بما فيه الكفاية الآن . اما التعريف الرياضي الدقيق ففيه قليل من الصعوبة .

تتطلب فكرة سكونية المصدر عدم التغير مع الزمن . ولكن اذا اعتبرنا مصدرا لآلواج الاحرف يتوقف فيه احتمال الحرف الثاني على الحرف الاول . وبدأنا من الحرف A فان حرفا مختلفة متعددة قد تتالي بينما اذا بدأنا من الحرف Q فان الحرف التالي سيكون قطعا U . وبصورة عامة فان نمط انطلاق المصدر سيؤثر على البنية الاحصائية لسلسلة الاحرف المنتجة ، على الاقل لعدد غير ضئيل من عناصر هذه السلسلة .

يقترح الرياضي ، بهدف الالتفاف حول هذه النقطة ، اعتبار أكثر من سلسلة من الاحرف يمكن للمصدر انتاجها . فالتنا في كل الاحوال آلة تخيلية ، لذا نستطيع ان نتخيل وبمنتهى البساطة انها اقلعت عددا غير منته من المرات منتجة بذلك عدد غير منته من سلاسل الاحرف . يسمى هذا العدد الغير منتهى من السلاسل بمجموعة السلاسل .

نستطيع بدء هذه السلاسل باي طريقة نشاء ، فمثلا في حالة مصدر لازواج الاحرف ، يمكننا اذا شئنا بدء ( نسبة من السلاسل قدرها  $\frac{1}{13}$  بحرف E ( هذا هو احتمال ورود الحرف E في النصوص الانكليزية ) ، وبدء نسبة اخرى من السلاسل نسبتها  $\frac{2}{13}$  بحرف W ( احتمال الحرف W ) وهكذا . اذا نفذنا ذلك وحسبنا متوسط عدد السلاسل التي يرد الحرف E في مطلع كل منها ( وهو  $\frac{13}{13}$  بالطبع ) وكذلك متوسط عدد السلاسل التي يرد الحرف Z في الموقع الثالث من كل منها وهكذا ، لوجدنا ان هذا المتوسط سيساوي على الدوام  $\frac{13}{13}$  ينطبق هذا الامر على اي موقع نختاره في السلسلة وعلى اي حرف آخر غير حرف E ، اذ سيكون على الدوام متوسط عدد السلاسل التي يرد الحرف المعبر فيها في موقع معين مساويا لاحتمال ذلك الحرف . ينسحب هذا ايضا على الأزواج ، فمتوسط عدد السلاسل التي يرد فيها زوج مثل TH أو WE في موقع معين من كل سلسلة لا علاقة له بالموقع المعبر .

هذا ما نعنيه بمصطلح السكونية اذا ربطنا احتمالات معينة بشروط البدء الخاصة بانشاء مجموعة من سلاسل الاحرف التي يقدمها مصدر توليد للاحرف واذا قمنا بعد ذلك باجراء أية عملية احصائية عند موقع معين من كل سلسلة . وكانت متوسطات الاحتمالات المحسوبة بالاستناد الى هذه العملية مستقلة عن الموقع الذي جرت عنده العملية الاحصائية ، كان المصدر في هذه الحالة سكونيا . يبدو هذا التعريف غامضا او صعبا بالنسبة للقارئ ، الا ان الصعوبة تبرز عند محاولة اعطاء شكل رياضي دقيق ومفيد لفكرة قد تظهر من جهة اخرى عديمة الفائدة رياضيا .

اعتبرنا في مناقشتنا السابقة لدى دراستنا مجموعة السلاسل الغير منتهية التي يولدها مصدر معين ، المتوسطات عبر كل الاحرف الواردة في الموقع الاول من كل سلسلة ثم عبر كل الاحرف الواردة في الموقع الثاني من كل سلسلة ثم في الموقع الثالث وهكذا وكررنا العمل بعد ذلك بحساب المتوسطات عبر كل الثنائيات الواردة في مواقع مناظرة ثم الثلاثيات وهكذا تباعا . يدعى المتوسط المترتب على مثل هذه الحسابات بمتوسط المجموعة وهو يختلف عن متوسط آخر كنا قد تعرضنا له سابقا في هذا الفصل حيث قمنا بخلط كل الاحرف الواردة في سلسلة واحدة فقط واخذنا المتوسط عبر هذا الخليط ، يدعى مثل هذا المتوسط الاخير بالمتوسط الزمني .

يمكن للمتوسطين الانفي الذكر ان يكونا مختلفين . نفرض على سبيل المثال مصدرا يعطي في ثلث عدد مرات اقلاعه الحرف A ويصدر بعد كل من هذه الاقلاعات الحرفين A B بالتناوب وفي الثلث الثاني يعطي الحرف B ثم الحرفين A B بالتناوب ، اما في الثلث الثالث فلا يعطي الا الحرف A . تكون السلاسل الممكنة وفق ذلك :

A B A B A B .....  
 B A B A B A .....  
 E E E E E E .....

يتضح بشكل مباشر ان هذا المصدر سكوني ونسدرج في الجدول التالي الاحتمالات الخاصة به .

احتمال	المتوسط الزمني . السلسلة الاولى	المتوسط الزمني السلسلة الثانية	المتوسط الزمني السلسلة الثالثة	متوسط المجموعة
A	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	0	$\frac{1}{3}$
B	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	0	$\frac{1}{3}$
E	0	0	1	$\frac{1}{3}$

إذا كان المصدر ساكناً وكان كل متوسط مجموعي ممكن ( لا احرف ،  
الأزواج ، الثلاثيات وغيرها ) مساوياً للمتوسط الزمني المقابل ، دمي  
المصدر في هذه الحالة مصدراً مستقراً . تنطبق النظريات البرهنة في  
الفصول المقبلة والمتعلقة بنظرية المعلومات على المصادر المستقرة وتستند  
براهينها الى افتراض ان مصدر الارسال هو مصدر مستقر . لقد جرى  
تقدم لا بأس به في مجال ترميز المصادر غير الساكنة الا اننا لن نتعرض  
لها في هذا الكتاب .

تتناول نظرية المعلومات المصادر المنعزلة التي تولد سلاسل من  
الاحرف وقد عرضنا لها للتو ، والى جانب ذلك تعنى نظرية المعلومات  
بالمصادر المستمرة التي تصدر اشهرات متغيرة مستمرة كأمواج التخاطب  
الصوتية او التيارات الكهربائية المتغيرة المستخدمة في الهاتف . ان هذه  
المصادر هي من النوع المستقر .

لماذا يشكل المصدر المستقر نموذجاً رياضياً ملائماً ومثمراً لدى تطبيقه؟  
ان لم يكن لسبب فلاننا نرى بالعودة الى تعريف المصدر المستقر . ان  
الاحصائيات الخاصة برسالة مثلاً تبرز تواتر حرف معين كالخرف E  
او زوج مثل TH او تركيب ثلاثي او غيره ، كل هذه الاحصائيات لا تتغير  
على طول الرسالة ، وكلما ذهبنا أبعد بالرسالة نحصل على تقديرات أجود  
لاحتمالات ورود الاحرف المختلفة وزمرها . وبكلمات اوضح : اذا اختبرنا  
مقاطع أطول وأطول من الرسالة نتوصل وعلى الدوام لتوصيف رياضي  
للمصدر أجود وأجود .

ان الاحتمالات وتوصيف المصدر التي نحصل عليها وفق ما تقدم  
تنطبق على كل الرسائل التي يولدها المصدر وليس على الرسالة المختبرة  
فقط ، وسبب ذلك هو تساوي متوسط المجموعة والمتوسط الزمني .

وهكذا فالمصدر المستقر هو نوع خاص وبسيط من مصادر الرسائل  
الاحتمالية او العشوائية ، والعمليات البسيطة اسهل من منظور التناول

الرياضي بالمقارنة مع نظائرها المعقدة . الا ان البساطة بحد ذاتها لا تكفي فالمصدر المستقر لا يمكن ان يكون موضع اهتمام في نظرية الاتصالات اذا لم يكن واقعياً بدرجة كافية الى جانب بساطته .

يتضح في نظرية الاتصالات جانبين ، يتصف الاول بالدقة الرياضية البالغة ويعالج المصادر المستقرة الافتراضية والتي نتخيل ان بإمكانها اصدار مجموعات لا نهاية لها من سلاسل تحتوي كل منها على عدد لا نهاية له من الرموز . ولنا حرية الخيار كاملة فيما يتعلق اما بدراسة المصدر بحد ذاته او اختبار المجموعات اللانهائية من الرسائل التي بإمكانه ان يولدها .

نستخدم النظريات المدرجة في نظرية الاتصالات لتغطية المشاكل المتعلقة بارسال النصوص اللغوية الحقيقية . ليس الكائن الانساني آلة رياضية افتراضية فهو لا يستطيع انتاج حتى سلسلة واحدة لا نهائية من الاحرف ناهيك عن عدد لا نهاية له من المجموعات تحتوي كل منها على عدد لا نهاية له من هذه السلاسل .

الا ان الانسان لا يستطيع انتاج سلاسل باللغة الطول من الاحرف ، ويقدم كل الكتاب مجموعات كبيرة من هذه السلاسل الطويلة . يشكل جزء من هذا الخرج الهائل من السلاسل باللغة الطول الرسائل التي ترسل فعلاً عبر لوحة البرق .

وهكذا سنفترض ان مجموع كل الذين يبرقون هو بحد ذاته مصدر مستقر للرسائل البرقية ، وكذا مجموع كل الذين يتخاطبون عبر الهاتف هو مصدر مستقر للاشارات الهاتفية . ان مثل هذه الافتراضات تقريبية بدرجة كافية وهي قابلة للتطبيق لدى من يتكلمون لغة واحدة ، اذ لا يمكن ان نعتبر كمصدر مستقر مجموع من يستخدمون اللغتين العربية والانكليزية فالخرج المرتبط بكل من هاتين اللغتين له احتمالاته وحساباته الاحصائية الخاصة وهي تختلف بشكل جذري عن احتمالات وحسابات الفئة الأخرى

لا يمكننا أن نؤكد أن مجموع الكتاب هو مصدر مستقر للرسائل وفق المعنى الدقيق لهذا المصطلح . إذ تختلف الإحصائيات اللغوية نوعاً ما باختلاف موضوع النصوص وهدفها ، كما أن أسلوب الإنشاء يختلف من شخص لآخر .

نلاحظ ما يشابه ذلك في حالة التخاطب عبر الهاتف فبعض الناس يتحدثون بنعومة وبعضهم بخشونة ، بينما يقتصر البعض الآخر على اللهجة الخشنة في حالة الغضب فقط . وكل ما نستطيع تأكيد في هذه المجالات أننا نجانب ملحوظاً في إحصائيات الرسائل كحالة احتمال ورود الحرف e في عينات مختلفة من النصوص الإنكليزية .

يجب أن نتذكر على الدوام الفارق الهام بين المصدر المستقر النظري وفق النظرية الرياضية للاتصالات ومصدر الرسائل المستقر التقريبي في العالم الواقعي لنا ، فنعرض تحفظات معقولة لدى تطبيقنا خلاصة النظرية الرياضية للاتصالات على المسائل العملية . ولا شك أن كلاً منا قد تعود ذلك في مجالات أخرى ، فمثلاً تؤكد لنا الرياضيات أن بإمكاننا تحديد مركز الدائرة بدقة إذا أعطينا ثلاثة نقاط منها ، إلا أنه لا يوجد إنسان عاقل يفكر بإمكان تحديد مركز دائرة مرسومة للتو على قطعة من الورق وفاقدة بعض معالمها بأن يلجأ مثلاً إلى ثلاثة نقاط على محيط هذه الدائرة تبعد من بعضها البعض بأقل من جزء من ألف جزء من السنتيمتر وكل ما يمكن أن يفعله في هذه الحالة هو استخدام بدايته للحصول على تحديد أمثل لموقع المركز ومن ثم قياس البعد بين هذا المركز ونقطة واضحة من محيط الدائرة . أوردنا هذا المثال لتبيان نوع الحكم والتحفظ الذي يستخدم عادة عند تطبيق نظرية رياضية دقيقة على حالة عملية .

ومهما كان من أمر تحفظاتنا فإن تساؤلات فلسفية تطرح نفسها سيما وإننا قد استخدمنا نموذجاً رياضياً احتمالياً عشوائياً لتمثيل الإنسان كمصدر للرسائل . هل يعني ما فعلناه أن الإنسان يتصرف بشكل عشوائي ، أن الأمر ليس بهذه البساطة ، وربما لو استطعنا معرفة المزيد



عن الإنسان ومحيطه وتاريخه لتمكنا على الدوام من التنبؤ بالكلمة التالية التي سينطقها أو سيكتبها انسان معين .

نفرض في نظرية الاتصالات اننا نحصل معرفتنا عن مصدر الارسال اما من الرسائل التي يولدها هذا المصدر او ربما من دراسة غير متكاملة للانسان بحد ذاته . وبلاستناد الى ذلك يمكن ان نظفر ببعض المعلومات الاحصائية التي تساعد في زيادة احتمال معرفة ما يمكن ان تكون عليه الكلمة التالية من رسالة معينة . يبقى هناك عنصرا من الريبة . يتصرف مصدر الرسائل بالنسبة لنا كما لو ان خيارات معينة كانت تجري بشكل عشوائي ذلك لاننا لا نملك معرفة كاملة بهذا المصدر وهكذا لا يمكننا التنبؤ مما ستكون عليه هذه الخيارات . ولو كان بإمكاننا التنبؤ بها اذن لوظفنا معارفنا لسبر غور المعلومات الاحصائية الخاصة بالمصدر . ولو استطعنا تحصيل كم اكبر من المعلومات لكان من الممكن ان نضع يدنا على حقيقة ان تلك الخيارات ليست عشوائية في واقعها بمعنى انه يمكن التنبؤ بها ( وذلك بالاستناد الى المعلومات التي ليست بحوزتنا ) .

نستنتج الآن ان ما عرفناه عن الآلات المتناهية الحالات كتلك في الشكل ٣ - ١ كان محدودا فعلا ، فلتلك الآلات دخلها وخرجها ، والانتقال من احدى حالاتها الى حالة اخرى لا يجب وبالضرورة ان يتم من خلال خيار عشوائي ، اذ ان مثل هذا الانتقال قد يقرر او على الاقل يتاثر بمختلف اشكال الدخول لتلك الآلة . وعلى سبيل المثال ، يقرر عمل الحاسب الالكتروني ، وهو آلة متناهية الحالات ، بالبرنامج والمعلومات التي يغذيها بها المبرمج .

يبدو امرا طبيعيا ان نفترض الانسان على انه آلة متناهية الحالات ليس فقط بسبب كونه مصدرا للرسائل يولد الكلمات ، بل في كل جوانب سلوكه الاخرى . نستطيع ان نتصور اذا شئنا ان كل حالات وتشكيلات الخلايا العصبية انما هي حالات الآلة موضوع البحث ( حالات الدماغ ، ربما ) . واذا ذهبنا ابعد من ذلك فتصورنا الانتقال من حالة

لاخرى ، احيانا من طريق اصدار كلمة ، حرف ، أو صوت أو جزء من صوت ، وفي احيان اخرى من طريق القيام بفعل ما أو جزء من فعل . وهكذا يكون النظر والسمع واللمس وغيرها من الحواس اشكال مختلفة للدخل تقرر أو تؤثر في الحالة التالية التي تنتقل اليها الآلة . إذا كان الانسان آلة متناهية الحالات فعلا ، فعدد حالاته سيتجاوز وبشكل خيالي اي امكانية للاحاطة الرياضية بها . الا أن تشكيلات جزئيات الغازات تشابه هذا الوضع الى حد كبير ، ورغم ذلك نستطيع رصد تصرفات الغاز بمعرفة ضغطه وحرارته فقط .

هل ستمكن في أحد الأيام من معرفة العوامل الهامة التي تكمن وراء عمل الدماغ في اصداره للنصوص المكتوبة وباقي النشاطات على حد سواء؟ كما رأينا ، نستطيع التنبؤ وبشكل جيد عن البنية الاحصائية للنص الذي قد يقدم انسان ما على كتابته ، الا اذا عمد الانسان المعني للتصرف بشكل مخالف ، وعلى الرغم من ذلك فسيفشل في مجانبه عاداته بشكل كامل .

ليست هذه الاعتبارات العامة ، بالطبع ، الهدف الحقيقي لهذا الفصل . فقد انطلقنا للبحث عن نموذج رياضي يكفي لتمثيل الجوانب المختلفة من الكائن الانساني المتعلقة بدوره كمصدر للرسائل ويكفي ايضا لتمثيل النقاط البارزة في الرسائل التي يصدرها . ورأينا بأخذ النصوص الانكليزية كمثال أن تواترات ورود كل الاحرف ثابتة بشكل ملفت للنظر الا اذا رغب الكاتب ان يتحاشى بعض الاحرف بشكل متعمد . وبالمثل فتواترات ورود ازواج وثلاثيات الاحرف والزمرة الاعلى ايضا بما فيها الكلمات ، هي ثابتة بدورها .

ورأينا ايضا كيفية توليد سلاسل من الاحرف بتواترات تقابل ما يرد في النصوص الانكليزية باستخدام عمليات عشوائية احتمالية مختلفة كنقل كلمات أو احرف نص ما على بطاقات منفصلة ، ثم خلط البطاقات وسحبها بعد ذلك واحدة تلو الأخرى واستخدام ما يرد في كل واحدة لتكوين السلسلة المبتغاة . تستطيع العمليات العشوائية الأكثر تقدما كتلك التي تنفذها الآلات المتناهية الحالات ، ان تنتج تقريبا أكبر للنصوص الطبيعية الانكليزية .

وهكذا يمكننا اعتبار العملية العشوائية المعممة كنموذج لمصدر رسائل كمثل مصدر يولد النصوص الانكليزية . ولكن كيف نستطيع تعريف أو تحديد العمليات العشوائية رياضياً بحيث نتمكن من اثبات النظريات الضرورية لترميز الرسائل المولدة من قبل المصدر ؟ يجب بالطبع ان نختار التعريف بحيث يأتي متسقاً مع خصائص النصوص الانكليزية الفعلية .

ان المصدر المستقر هو صنف المصدر العشوائي الذي يتم اختياره كنموذج لمصدر الرسائل الفعلي . ويمكن النظر للمصدر المستقر كحالة افتراضية تنتج عدداً لا نهاية له من مجموعات تحوي كل منها عدداً لا نهاية له من سلاسل من الاحرف لا نهائية . يمكننا القول وبشكل مقبول أن الاحصائيات المرتبطة بسلاسل الاحرف أو الرسائل التي ينتجها مصدر مستقر لا تتغير مع الوقت ، فالمصدر اذن متوازن فعلاً . وأكثر من ذلك ، ففي حالة المصدر المستقر تنطبق الاحصاءات المستمدة من رسالة معينة على سائر الرسائل التي يولدها المصدر نفسه .

تبرهن الاستنتاجات المتعلقة بنظرية الاتصالات من اجل المصادر المستقرة الافتراضية . يشكل كل الكتاب مصدراً مستقراً تقريباً للنصوص لا يفترق المصدر المستقر الافتراضي عن المصدر المستقر الفعلي الا قليلاً ، لذا نستطيع تطبيق رياضيات الاول على الثاني والحصول على نتائج مفيدة . الا أننا يجب ان نأخذ ما يلزم من الحذر عند تطبيق احكام نظرية الاتصالات الرياضية المصاغة لمصادر افتراضية ، على المشاكل الفعلية للاتصالات .





## الفصل الرابع

### الترميز ونظام العد السنائي

يمكن أن يكون المصدر المعلوماتي نصاً مكتوباً ، انساناً يتكلم ، اصوات جوقة موسيقية ، صوراً ، أفلاماً سينمائية ، او مشاهد يمكن تسديد الكاميرا التلفزيونية ناحتها . رأينا ، انه وفق نظرية المعلومات ، تعتبر هذه المصادر مالكة لخصائص المصادر المستقرة التي تولد الاحرف ، الأعداد ، او الاشارات الكهربائية . ان الهدف الرئيسي لنظرية المعلومات هو دراسة كيفية ترميز سلاسل الاحرف والاشارات هذه بأكثر فعالية ممكنة وبوسائل كهربائية عموماً ، وذلك لإعدادها للإرسال .

لقد سمع الجميع عن الرموز وترميز الرسائل ، او ما يسمى بالشفرة . وتزخر المكتبات بقصص الأبطال الخياليين الذين يستخدمون الرسائل المرمزة السرية لتنفيذ اعمالهم الخارقة .

استخدمت الكتابة السرية بمعناها التاريخي الرموز لإخفاء مضامين الرسائل الهامة عن كل الذين لم تكن تلك الرسائل تقصدهم . ويمكن تنفيذ ذلك بتبديل كلمات الرسائل بكلمات أخرى مقابلة وفق قاموس ترميز معين . وفي طريقة أخرى للترميز هي طريقة التشفير يستعاض عن الاحرف والأعداد باحرف أخرى وفق اتفاق بين الأطراف المعنية .

نورد فكرة الترميز ، اي فكرة تمثيل شيء بآخر ، في مجالات أخرى ايضاً . يعتقد علماء الوراثة ان الخطة الشاملة لعمل الجسم الانساني

مكتوبة في الموروثات المدفونة في الخلية التناسلية ويؤكدون أن النص الوراثي يتكون من ترتيب خطي لأربع وحدات داخل حمض الـ DNA المكون للموروثات . ينتج هذا النص بدوره نصاً مكافئاً في حمض الـ RNA ، حيث يتم بواسطة هذا الأخير تصنيع البروتينات من عشرين نوع من الحموض الأمينية . وقد جرت دراسات معمقة لفهم الطريقة التي يعاد وفقها ترميز رسالة الـ RNA الوراثية ذات الأربع مقاطع بحيث تتحول الى رسالة البروتين ذات العشرين مقطع .

توصل علماء الوراثة الى هذه الاعتبارات بسبب وجود نظرية المعلومات . ادت دراسة انتقال المعلومات لفهم جديد وعام لمسائل الترميز ، وهو فهم على جانب كبير من الأهمية سواء في مجال ترميز الرسائل ، أو مجال ترميز المعلومات الوراثية .

استعرضنا في الفصل الثاني كيفية ترميز نص لغوي وفق طريقة مورس باستخدام نبضات كهربائية طويلة وقصيرة تفصل بينها فواصل طويلة وقصيرة . كان ذلك مثال بسيط للترميز . ترى نظرية المعلومات في الأمواج الكهرومغناطيسية التي ترتحل من دار الإذاعة وحتى الراديو في كل منزل أسلوباً في ترميز الموسيقى وسواها مما نسمعه لدى إدارتنا مفتاح جهاز الراديو . وكذلك شأن التيارات الكهربائية في أسلاك الهاتف فهي ترميز للخطاب المتبادل وأخيراً فأمواج الانضغاط والتخلخل في الهواء الناقلة للصوت ما هي إلا ترميز لحركات الحبال الصوتية التي تصدر الأصوات .

حددت الطبيعة ترميز حركات الحبال الصوتية على شكل أصوات التخاطب إلا أنه يمكن لمهندس الاتصالات اختيار طريقة الترميز التي سيمثل بواسطتها أصوات التخاطب بتيارات كهربائية ، تماماً كما يختار نظام النقاط والخطوط والفواصل لتمثيل الأحرف الأبجدية في الإرسال البرقي . ويسمى هذا المهندس لتحقيق أفضل ترميز ممكن ، وللوصول الى هذه الغاية لا بد من وجود معيار يفصل المهندس بواسطته بين الترميز

الفعال والترميز السيء كما وأن هذا المهندس يجب أن يمتلك النظرة  
الثاقبة لإنجاز الترميز المنشود . سبق أن تعلمنا بعض هذه الأمور في  
الفصل الثاني .

أدت دراسة هذه المشكلة بالذات ، وهي دراسة قد تبدو بحد ذاتها  
محدودة ، الى تطوير أفكار هامة عبر نظرية المعلومات ، تتجسد أكثر  
ما يمكن في مجال الترميز سواء في إصدار الرسائل السرية أو كشف  
الشفيرة الوراثية . تضمنت هذه الأفكار معياراً لكم المعلوماتي هو  
الانتروبي وواحدة لقياس المعلومات هي البيت Bit . .

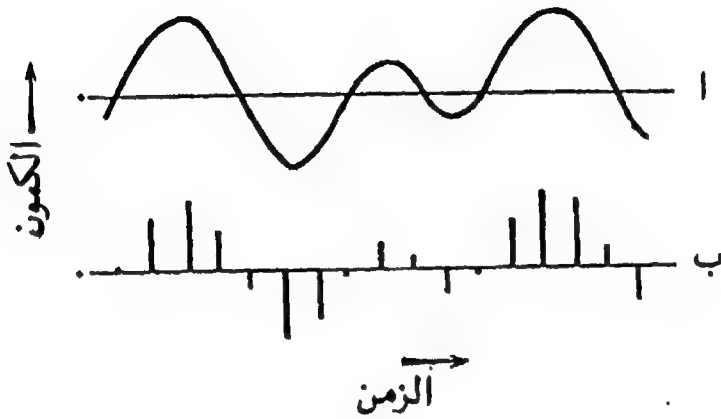
أميل الى الاعتقاد في هذه المرحلة أن القارئ قد أصبح في وضع  
المطالبة الملحة . لمعرفة معنى ( الكم المعلوماتي ) كما يقاس بالبيت ، وإذا  
كان هذا هو حاله فعلاً ، فأرجو أن يحمله حماسه عبر كميات من المعلومات  
الوسيلة تتناول ترميز الرسائل .

لعله أمر بديهي أن أحداً ما لن يستطيع فهم وتقييم حل مسألة معينة  
إلا إذا كان لديه فكرة عن المسألة بحد ذاتها . لن يستطيع أي منا شرح  
الموسيقى لشخص لم يسمع في حياته أي عمل موسيقي . أشعر بشكل  
مماثل أنه كي نستطيع تقييم الحاجة لقياس الكم المعلوماتي وفهم معناه  
لا بد لنا من التناول التفصيلي لكيفية ترميز الرسائل بغية بثها برقياً .

نلجأ الى الأمثلة البسيطة بغية فهم مشكلة الترميز . ونهدف في  
النهاية بالطبع الى تعلم ما له فائدة واسعة ، وعند ذلك نتوقع  
بعض الصعوبات .

تتكون بعض الرسائل الهامة من سلاسل من الأحرف المنفصلة  
كأحرف الأبجدية المتتالية أو الأعداد المتتالية في خرج الكمبيوتر .  
لقد بينا فيما سبق أن أنواعاً أخرى من الرسائل تختلف بشكل جذري .

ان الأصوات والموسيقى هي تغيرات ضغط الهواء عند اذن السامع .  
نمثل هذا الضغط وبدرجة كافية من الدقة لدى استعمالنا الهاتف  
بتغيرات كمون اشارة كهربائية مرتبطة عبر الأسلاك أو بكمية أخرى  
مناسبة . يمثل الشكل ٤ - ١ تغير مثل هذه الاشارة مع الزمن حيث  
نفرض أن الاشارة هي عبارة عن كمون كهربائي متغير مع الوقت ، كما  
يوضح الخط المتموج .



الشكل ٤ - ١

تصبح نظرية المعلومات محدودة الأهمية إذا لم تكن قابلة التطبيق  
على الرسائل والاشارات المستمرة ، كقابليتها للتطبيق على الرسائل  
المنعزلة ، كالتصوصى اللغوية .

تستحضر نظرية المعلومات لدى تناولها الاشارات المستمرة نظرية  
رياضية هي نظرية العينات ، وسنقوم باستخدامها دون برهانها . تنص  
هذه النظرية على أنه يمكننا تمثيل الاشارة المستمرة بشكل كامل وكذلك  
اعادة انشائها بكل تفاصيلها إذا توفر لدينا عينات أو قياسات لسمتها



منجزة عند لحظات زمنية تفصل بينها فترات متساوية . يجب أن تكون هذه الفترة مساوية أو اقل من نصف دور أعلى تواتر متواجد في الإشارة . وإذا عدنا الى الشكل ٤ - ١ الممثل لإشارة متغيرة مع الزمن فإن العينات المطلوبة في حالة هذه الإشارة يمكن تمثيلها بخطوط شاقولية كما هو موضح في القسم الأسفل من نفس الشكل .

يجب أن نلاحظ أن قدرة هذه العينات على تمثيل الإشارة بشكل كامل تتوقف على توفر عدد كبير منها بدرجة كافية . نحتاج في حالة تواترات الصوت المحصورة بين . و ٤٠٠٠ هـ ف ث الى ٨٠٠٠ عينة في كل ثانية ، أما في الإشارة التلفزيونية التي يتراوح تواترها بين . الى ٤ ملايين هـ ف ث فنحتاج الى ٨ ملايين عينة في كل ثانية . وبصورة عامة إذا كان عرض مجال تواتر الإشارة هو س هـ ف ث ، فنحتاج على الأقل لـ ٢ س عينة في كل ثانية لتوصيفه هذه الإشارة بشكل كامل .

وهكذا تمكنا نظرية العينات من تمثيل إشارة مستمرة بسلسلة من العينات مختلفة السعات . تختلف هذه السلسلة ، على كل حال ، عن سلسلة الأحرف أو الأرقام ، فهناك عدد من الأرقام ( ١٠ ، ٢ ، ٣ ، ٤ ، ٥ ، ٦ ، ٧ ، ٨ ، ٩ ) والأحرف ( الأحرف الأبجدية ) بينما يمكن للعينة أن تتضمن عدداً لا نهاية له من السعات المختلفة . أن كل سعة في عينة يمكنها أن تقع في أي نقطة من مجال مستمر من القيم ، بينما لا ينتقى الرقم أو الحرف الا من مجموعة محددة من العناصر المنزلة .

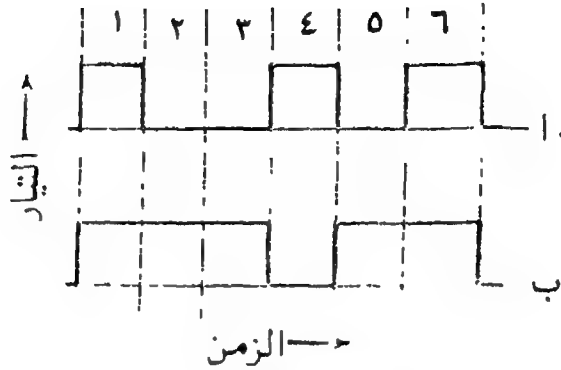
إذا اعتبرنا الطريقة التي تتعامل بها نظرية المعلومات مع العينات ذات المجال المستمر من السعات -لراينا هذه الطريقة تشكل بحثاً بحد ذاته ستعود اليه فيما بعد . سنقتصر هنا على ملاحظة مفادها أنه ليس من الضروري أن توصف الإشارة أو تستعاد بشكل كامل ، ففي الاجهزة

الفيزيائية الواقعية لا يمكن استرجاع الإشارة بصيغتها الأصلية . وتكتفي في إرسال الأصوات مثلاً بتمثيل سعة العينة بدقة ١٪ . وهكذا يمكننا ، إذا رغبتنا ، قصر أنفسنا على الأعداد بين ٠ إلى ٩٩ في مجال توصيف سمات عينات الأصوات المتتالية وتمثيل سعة عينة محددة بأحد الأعداد المئة المذكورة حيث ستكون بذلك قريبة من السعة الحقيقية بدرجة كافية . نستطيع بواسطة عملية تجزئة الإشارة إلى عينات الحصول على تمثيل شبيه بحالة الإشارات المنعزلة الممثلة لنص لغوي .

استطعنا باستخدام العينات المحددة القيم تحويل مسألة ترميز إشارة مستمرة كالصوت مثلاً إلى مسألة أبسط هي ترميز إشارات منعزلة كأحرف النصوص اللغوية .

رأينا في الفصل الثاني أن النصوص اللغوية يمكن بثها حرفاً بحرف باستخدام طريقة مورس في الترميز ، وبطريقة مماثلة يمكن بث هذه الرسائل عبر لوحة المبرقة . أن ضغط أحد أزرار هذه اللوحة يؤدي إلى إمرار سلسلة من النبضات الكهربائية والفواصل عبر الدارة . عندما تصل هذه النبضات والفواصل جهاز الاستقبال تعرض الزر المقابل فتطبع إذ ذاك الآلة الحروف المرسل .

تشكل قطارات النبضات والفواصل طريقة عامة ومفيدة لتوصيف أو ترميز الرسائل . وعلى الرغم من أن شيفرة مورس ورموز المبرقة تستخدم نبضات وفواصل من أطوال مختلفة فإنه بالمقابل يمكن بث الرسائل باستخدام النبضات والفواصل المتساوية الطول المرسل عبر فترات زمنية متساوية . يوضح الشكل ٤ - ٢ كيف يمكننا أن نستخدم النبضات والفواصل المتساوية في تشكيل إشارتين مختلفتين ، تتكون كل منهما من ستة فترات ، فأما الإشارة ١ فتتكون من : نبضة - فاصل - فاصل - نبضة - نبضة - فاصل ، في حين تتكون الإشارة ٢ من : نبضة - نبضة - نبضة - فاصل - نبضة - نبضة .



الشكل ٤ - ٢

يحدد وجود نبضة أو فاصل في فترة معينة إحدى إمكانيتين ، فيمكننا بذلك من الاستخدام أي زوج من الرموز لتمثيل النبضة والفاصل ، ونجد من بين أزواج هذه الرموز : نعم - لا ، + - - ، - - - ، ١ - ٠ .

وبذلك نمثل الإشارة ٢ على النحو :

نبضة	فاصل	نبضة	فاصل	نبضة	فاصل
نعم	لا	نعم	لا	نعم	لا
+	-	+	-	+	-
١	٠	١	٠	١	٠

يتسم التمثيل باستخدام الرمزين ٠ ، ١ بكونه هام وملائم بشكل خاص ، إذ يمكن استخدامه لربط قطارات الأمواج بنظام العد الثني . عندما نكتب العدد ٣١٥ نعني :

$$\begin{aligned}
 & ٠ \quad ١ \quad ٢ \\
 & ١٠ \times ٥ + ١٠ \times ١ + ١٠ \times ٣ \\
 & ١ \times ٥ + ١٠ \times ١ + ١٠٠ \times ٣ = \\
 & ٣١٥ =
 \end{aligned}$$

نستخدم في النظام العشري المعتاد هذا الارقام العشرة : ٠ ، ١ ، ٢ ، ٣ ، ٤ ، ٥ ، ٦ ، ٧ ، ٨ ، ٩ . اما في النظام المثنى فنستخدم الرقمين ٠ ، ١ . وهكذا عندما نكتب في هذا النظام ١٠٠١٠١ فإنما نعني :

$$\begin{array}{cccccc} & ٥ & ٤ & ٣ & ٢ & ١ & ٠ \\ & ٢ \times ١ & + ٢ \times ٠ & + ٢ \times ١ & + ٢ \times ٠ & + ٢ \times ١ & + ٢ \times ٠ \\ & ٣٧ = ١ \times ١ & + ٤ \times ١ & + ٣٢ \times ١ & = \end{array}$$

في النظام العشري

قد يكون من المناسب احيانا كتابة الاعداد وإضافة اصفار الى يسارها ، ان هذا لا يغير من قيمة العدد . وهكذا ففي النظام العشري :

$$١٦ = ٠٠١٦$$

اما المساواة المقابلة في النظام المثنى فهي :

$$١٠٠٠٠ = ٠٠١٠٠٠٠$$

يدعي كل من الرقمين ٠ او ١ في النظام المثنى برقم مثنى . اذا اردنا توصيف النبضات او الفواصل الواردة في ستة فترات متتالية نستخدم ستة ارقام ثنائية مناسبة . ولما كانت النبضة او الفاصل في فترة واحدة تكافىء رقم مثنى ، نستطيع ان نتحدث في هذه الحالة عن زمرة نبضية من ستة ارقام ثنائية ، كذلك يمكننا ان نشير الى نبضة او فاصل في فترة معينة على انه رقم مثنى .

دعونا نبحث عن عدد الإشارات الممكنة والمختلفة باستخدام ثلاثة ثلاثة فترات متتالية نملئ كل منها بنبضة او فاصل ، بكلمة اوضح ما هو عدد الاعداد في النظام المثنى التي يتكون كل منها من ثلاثة ارقام ثنائية .

ان هذه الاعداد هي ببساطة :

المقابل العشري	العدد بالنظام المثنى
٠	٠٠٠
١	٠٠١
٢	٠١٠
٣	٠١١
٤	١٠٠
٥	١٠١
٦	١١٠
٧	١١١

٣  
 إذن فعدد الأعداد المطلوبة هو ثمانية ونلاحظ أن  $٨ = ٢^٣$  ، وبصورة  
 ن  
 أهم فعدد الأعداد الثنائية المكون كل منها من ن رقم مثنى هو : ٢  
 نوضح في الجدول التالي عدد الأعداد الثنائية المكون كل منها من ن  
 رقم مثنى وذلك من أجل بعض قيم ن :

ن ( عدد الأرقام الثنائية المستخدمة )	عدد الأعداد الناتجة ( نماذج من ن رقم مثنى )
١	٢
٢	٤
٣	٨
٤	١٦
٥	٣٢
١٠	١٠٢٤
٢٠	١٠٤٨٥٧٦

نلاحظ أن عدد الأعداد الناتجة أو عدد النماذج المكونة من ن رقم مثنى  
 يزداد بسرعة كبيرة جداً وسبب ذلك أننا نضاعف العدد المطلوب في كل مرة  
 نضيف مكان جديد في العدد المكون ، فعندما نضيف رقم نحصل على كل  
 الأعداد السابقة مسبوقة بـ ٠ ، وكذلك كل الأعداد السابقة مسبوقة بـ ١ .

يشكل النظام المثنى البديل الوحيد للنظام العشري ، اذ ان للنظام  
 الثماني اهمية خاصة لدى بناء اجهزة الكمبيوتر . يستخدم النظام  
 الثماني الأرقام الثمانية : ٠ ، ١ ، ٢ ، ٣ ، ٤ ، ٥ ، ٦ ، ٧ .  
 عندما تكتب ٣٥٦ في النظام الثماني تعني :

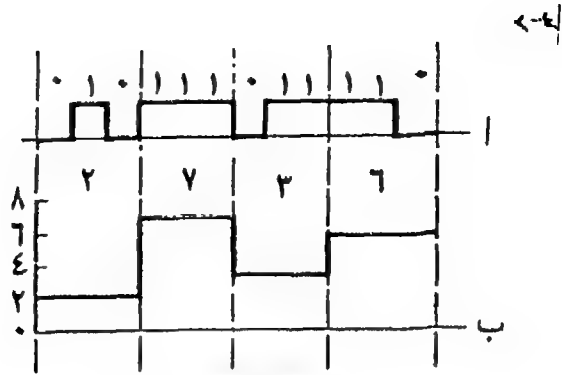
$$\begin{aligned} & 1 \times 6 + 8 \times 5 + 8 \times 3 = 356 \\ & 1 \times 6 + 8 \times 5 + 64 \times 3 = \\ & 238 = 6 + 40 + 192 = \end{aligned}$$

نستطيع التحويل بين النظامين المثنى والثماني بسهولة فائقة ، اذ  
 ما علينا إلا استبدال كل تركيب من ثلاثة ارقام ثنائية بمقابلها الثماني  
 كما في المثال التالي :

١١٠	١١١	٠١١	١١٠	مثنى
٢	٧	٣	٦	ثماني

يفضل من يستخدمون الكمبيوتر استظهار ومن ثم استدكار الأرقام  
 من النظام الثماني على التعامل مع السلاسل الطويلة من الأرقام الثنائية .  
 انهم يتعلمون تمييز زمر ثلاثية من الأرقام الثنائية والتعامل مع كل زمرة  
 كوحدة ، وهكذا ينظرون الى تسع ارقام ثنائية على انها ثلاثة زمر وبشكل  
 أوضح سلسلة من ثلاثة ارقام ثمانية .

انه امر ممتع حقاً ان نتناول سلاسل النبضات والفواصل وفق  
 نفس المنظور اي انها تمثل سلاسل من الأرقام الثنائية ، وبالتالي فسلسلة  
 من نبضات ذات سمات مختلفة تقابل سلسلة من الأرقام الثمانية ( ٠ ، ١ ،  
 ٢ ، ٣ ، ٤ ، ٥ ، ٦ ، ٧ ، ٨ ، ٩ ) . يوضح ذلك الشكل ٤ - ٣ . حيث  
 نرى في القسم أ منه سلسلة من الارسلال - التوقف ، أو الوصل -  
 فصل ، أو ١ - ، مقابلة للعدد المثنى : ٠١٠١١١٠١١١٠ ، أما العدد  
 الثماني المقابل فهو : ٢٧٣٦ ، بينما في القسم ب تمثيل آخر للعدد كاربعة  
 نبضات لها السمات التالية : ٦ ٣ ٧ ٢ .



الشكل ٤ - ٣

ان التحويل من النظام المثنى الى النظام العشري ليس امراً سهلاً .  
ويحتاج تمثيل كل رقم عشري حوالي ٣٣٢ رقم ثنائي . يمكننا بالطبع  
تخصيص اربع ارقام ثنائية لكل رقم عشري ، كما هو مبين في الجدول  
التالي الا ان ذلك يعني ضياع بعض التشكيلات دون استخدام ، فهناك  
من تلك التشكيلات اكثر مما يلزمنا :

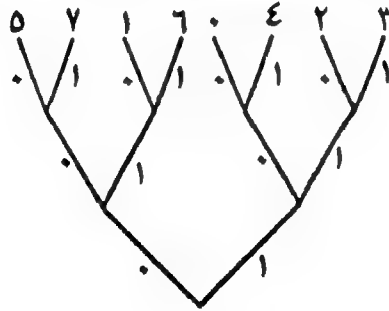
الرقم العشري	العدد المثنى
٠	٠٠٠٠
١	٠٠٠١
٢	٠٠١٠
٣	٠٠١١
٤	٠١٠٠
٥	٠١٠١
٦	٠١١٠
٧	٠١١١
٨	١٠٠٠
٩	١٠٠١
غير مستعمل	١٠١٠

غير مستعمل	١٠١١
غير مستعمل	١١٠٠
غير مستعمل	١٠١٠
غير مستعمل	١٠١٠
غير مستعمل	١١١١

إن اعتبار سلاسل النبضات والفواصل أو سلاسل ٠ و ١ على أنها أرقام ثنائية هو اعتبار ملائم حقاً ، يتيح لنا ذلك معرفة عدد السلاسل المختلفة وكذلك أسس التقابل بين أنظمة العد الثلاثة : المثنى والثماني والعشري . إلا يهمننا عند إرسال المعلومات العدد المقابل لسلسلة أرقام ثنائية ، إذ يكفي فقط أن نرسل الأرقام الثنائية الممثلة لعدد ثماني بصرف النظر عن هذا العدد ، فمثلاً نرسل : ٠٠٠ ٠٠١ ٠١٠ ٠١١ ١٠٠ ١٠١ ١١٠ ١١١ ولا يهمننا النظائر الثمانية ٠ ١ ٢ ٣ ٤ ٥ ٦ ٧ .

يمكننا اعتبار التقابل بين النظام المثنى وسواه بطريقة أخرى ، وتنطوي هذه الطريقة على تجاهل كون هذه الأرقام ممثلة لأعداد ثنائية واستخدامها بدلاً من ذلك لاختيار أو تحديد رمز معين .

يمثل كل ورود للصفر أو الواحد امكانية الخيار بين احتمالين .  
نعتبر مثلاً شجرة الاختيار الموضحة في الشكل ٤ - ٤ .



الشكل ٤ - ٤





تمتلك بعض الآلات الكاتبة ٨ زر مختلف بما في ذلك الرفع وزر  
الاعلاق ، ويمكن ان نضيف اليها آليتي التقدم بسطر واحد والعودة الى  
اول السطر . يمكن ان ارمز نشاطاتي باستخدام كل امكانات الآلة الكاتبة  
( باستثناء وضع الورق اللازم في الآلة ) وذلك باجراء خيارات متتالية  
من اصل الـ ٥٠ خيار المتوفر ، حيث يقابل كل خيار ٦٢٠٥ رقم مثنى .  
وكالعادة يمكن ان نستخدم ٦ ارقام ثنائية لكل زر من ازرار الآلة ونهدر  
بنتيجة ذلك بعض سلاسل الارقام الثنائية .

يتكون هذا الفائض بسبب وجود ٣٢ عدد مثنى من الاعداد المؤلفة  
من ٥ ارقام ثنائية وهو عدد قليل ، بينما يوجد ٦٤ عدد مثنى من الاعداد  
المؤلفة من ٦ ارقام ثنائية وهذا كثير الى حد ما . كيف يمكن ان نتحاشى  
مثل هذا الهدر ؟ اذا اعتبرنا ٥٠ رمز مختلف فانه يمكننا تكوين ١٢٥٠٠٠  
زمرة متباينة تتكون كل زمرة منها من ثلاثة من هذه الرموز . واذا عدنا  
الى الارقام الثنائية فنستطيع ان نكون ١٣١٠٧٢ تركيب مختلف بحيث  
يحتوي كل تركيب على ١٧ رقم مثنى . وهكذا اذا جزئنا النص الى  
زمر من ٣ احرف متتالية واذا ربطنا كل زمرة منها بعدد مثنى مكون  
من ١٧ رقم مثنى فنحصل على ترميز جيد ويفيض لدينا القليل . اما  
اذا مثلنا كل حرف ب ٦ ارقام ثنائية الاحتجنا ١٨ رقم مثنى في تمثيل  
٣ احرف متتالية ، وهكذا فان طريقة الترميز الاولى خفضت من  
استخدامنا للارقام الثنائية بنسبة  $\frac{17}{18}$  .

يمكننا بالطبع ترميز النصوص الانكليزية بشكل مغاير تماما .  
ونستطيع استخدام اللغة الانكليزية بشكل فعال اذا احطنا بمعاني حوالي  
١٦٣٨٤ كلمة وهو قاموس جيد من الكلمات . يعود اصل هذا الرقم  
الى اننا نعلم ان هناك ١٦٣٨٤ عدد مثنى يتكون كل منها من ١٤ رقم  
ثنائي . وهكذا بتخصيص ١٦٣٥٧ من هذه الاعداد لتمثيل الكلمات  
المستخدمة الضرورية وباقي الـ ٢٧ لتمثيل الاحرف والفراغ ، لحصلنا  
على ترميز جيد سيما وان وجود الاحرف سيفسح المجال لاستخدام

كلمات إضافية لم نلاحظها في القاموس المكون من ١٦٣٥٧ كلمة . ليس من الضروري أن نضع فراغاً بين الكلمات التي تقابلها رموز عديدة إذ يمكن أن نفترض أن الفراغ هو جزء من كل كلمة .

إذا برزت الحاجة لاستخدام بعض الكلمات بشكل غير متواتر ، فيتوجب علينا أن نستخدم ١٤ رقم مثنى لكل كلمة في هذا النوع من الترميز . تشير المعدلات الاحصائية الى أن وسطي عدد الاحرف في كل كلمة من كلمات اللغة الانكليزية هو ٥٫٤ حرف . ولما كان من المفروض أن نفصل الكلمات بفراغات عندما نبث الرسالة حرفاً بحرف يرتفع هذا العدد الى ٥٫٥ حتى في حالة اهمالنا بعض الاستخدامات الخاصة في النص كإيراد الاحرف الكبيرة وتوضيع الفواصل . إذا خصصنا ٥ أرقام ثنائية لكل حرف فسيصلنا ٢٧٥ رقم مثنى لكل كلمة ، بينما نحتاج فقط لـ ١٤ رقم مثنى لكل كلمة إذا لجأنا لترميز الكلمات بدلاً من الاحرف وقمنا ببثها كلمة بكلمة .

كيف يمكن أن يحدث ذلك ؟ إذا عمدنا لبث الرسالة حرفاً بحرف فسنستخدم إمكانات متكافئة الأرسال كل سلاسل الاحرف الانكليزية ، أما الأرسال كلمة بكلمة فسيقتصر الأمر على الكلمات الانكليزية وحسب .

أن عدد الأرقام الثنائية الضرورية لترميز كل كلمة من النصوص الانكليزية يتوقف الى حد بعيد على طريقة الترميز المعتمدة .

أن النصوص اللغوية هي نوع من جملة أنواع أخرى من الرسائل قد نرغب ببثها . تشتمل الأنواع الأخرى على سلاسل الأرقام ، الصوت البشري ، الصور المتحركة أو الصور الثابتة . وهكذا فإذا كانت هناك طرق فعالة وأخرى غير فعالة لترميز النصوص اللغوية ، فننتوقع بالمقابل أن يكون هناك طرق فعالة وأخرى غير فعالة في ترميز الرسائل الأخرى .

يغمرنا اعتقاد كبير بأنه يوجد من حيث المبدأ طريقة مثلى لترميز الإشارات الصادرة عن منبع للرسائل ، مثل هذه الطريقة ستحتاج عدداً أصغرياً من الأرقام الثنائية لكل حرف ولكل واحدة من زمن الأرسال .

إذا توفرت مثل هذه الطريقة المثلى لترميز الإشارة ، فنصطلح على استخدام العدد الوسطي للأرقام الثنائية اللازمة لترميز الإشارة كـمـعـيـار للمحتوى المعلوماتي أو الكم المعلوماتي في كل حرف أو كـمـعـيـار للكم المعلوماتي الذي يولده في كل ثانية مصدر الرسائل الذي أعطى الإشارة المعتبرة .

هذا ما نفعله بالضبط في نظرية المعلومات ، أما كيفية تحقيق الفعل وأسبابه فسنتركها للفصل القادم .

أما الآن ، فسنراجع وبسرعة ما قدمناه في هذا الفصل . نعتبر الترميز في نظرية المعلومات كقضية أساسية ، والترميز ببساطة هو تمثيل إشارة بغيرها . وهكذا تمثل أمواج الراديو أصوات التخاطب وبدا فهي ترميز لتلك الأصوات . يمكننا بحث الترميز ببساطة وعمق في حالة مصادر الرسائل المتقطعة والتي تولد رسائل مؤلفة من سلاسل من الأحرف أو الأرقام . أما عن الإشارات المستمرة ، فالامر أعقد إلا أنه لحسن الحظ نستطيع تمثيل الإشارة المستمرة بعينات من سعاتها وذلك باستخدام عدد من العينات في كل ثانية يساوي ضعف أعلى تواتر للإشارة ، وخير مثال على الإشارات المستمرة التيارات الكهربائية في خطوط الهاتف . بل ونستطيع أكثر من ذلك ، فبإمكاننا تمثيل سعات هذه العينات بأعداد صحيحة .

أن أهم طرق ترميز الأحرف أو الأعداد في نظرية الاتصالات هي تلك التي تعتمد سلاسل من القطع والوصل والتي بدورها يمكن أن تمثل بالأرقام الثنائية . ١٠٤ . وكمثال على ذلك : إذا استخدمنا سلاسل من زمر بحيث تتكون كل زمرة من ٤ أرقام ثنائية نستطيع تكوين ١٦ عدد ثنائي نخصص منها ١٠ لتمثيل الأرقام العشرية ، وإذا رفعنا محتوى كل زمرة إلى ٥ أرقام ثنائية ارتفع عدد الأعداد الثنائية المكونة إلى ٣٢ ، نجتزئ منها ٢٧ لتمثيل الأبجدية في اللغة الانكليزية مع فراغ مضاف . باختصار نستطيع إرسال الأعداد العشرية والنصوص اللغوية ببث سلاسل كهربائية تتضمن القطع والوصل .

يجدر بنا أن نقف عند فكرة هامة ، فعلى الرغم من أنه يبدو مريحاً أن نعتبر الأرقام الثنائية المستخدمة بهذا الشكل أعداداً ثنائية بالمعنى الرياضي ، فإن هذا المعنى ليس له أي أهمية البتة في عملنا ، إذ أن بمقدورنا اختيار أي عدد ثنائي لتمثيل عدد عشري معلوم .

إن استخدامنا لعشرة من الأعداد الثنائية المكون كل منها من أربعة أرقام ثنائية يعني هدرنا للأعداد الستة الأخرى . نستطيع أن نرسل هذه الأعداد وفق نفس تكتيك القطع والوصل ، إلا أننا لا نفعل ذلك أبداً . يمكننا تحاشي مثل هذا الهدر بترميز سلاسل مؤلفة من ٢ ، ٣ ، أو أكثر من الأرقام العشرية أو الأحرف الأخرى بواسطة الأرقام الثنائية . فمثلاً يمكننا تمثيل كل السلاسل المكونة من ثلاثة أرقام عشرية باستخدام عشرة أرقام ثنائية ، بينما يقتضي الأمر ١٢ رقم ثنائي لتمثيل المنفصل لكل من الأرقام العشرية الثلاثة .

إن ورود أي سلسلة من الأرقام العشرية هو أمر ممكن ، إلا أن سلاسل الأحرف لا ترد جميعها ، إذ لا يرد من سلاسل الأحرف إلا الكلمات المستخدمة في اللغة المعتبرة . ويبدو استناداً لهذه الحقيقة أن ترميز الكلمات باستخدام الأرقام الثنائية سيكون أكثر كفاءة من ترميز الأحرف الأبجدية تعزز هذه النتيجة صحة الفكرة القائلة أن ترميز السلاسل أكثر اقتصادية من ترميز عناصرها بشكل منفصل .

يقودنا كل ذلك إلى الحدس بأن هناك طريقة مثلى لترميز الرسائل التي يولدها مصدر رسائل ، وتعرف هذه الطريقة بكونها تحتاج إلى أصغر كمية ممكنة من الأرقام الثنائية .





## الفصل الخامس

### للترميز

استعرضنا في الفصل السابق طرقاً مختلفة لترميز الرسائل ، وتتضمن كل أنواع الاتصالات ، في الواقع ، ضرباً من الترميز . ففي الحالة الكهربائية ، يمكن ترميز الأحرف باستخدام نقاط وخطوط التيار الكهربائي أو شدة مختلفة للتيار واتجاهات عديدة لتدقيقه كما في مبرقة اديسون الرباعية . كذلك يمكننا ترميز الرسالة باستخدام الأرقام الثنائية : ٠ ، ١ وبها كهربائياً كسلسلة من النبضات والفواصل .

لقد بينا بالفعل أن أخذ العينات بشكل دوري من إشارة مستمرة كموجة التخاطب مثلاً ، وأن تمثيل شدة العينات بشكل تقريبي عن طريق انتقاء أقرب قيمة من مجموعة من الأعداد المنفصلة ، كل ذلك سيمكننا من تمثيل أو ترميز حتى الإشارات المستمرة باستخدام الأرقام الثنائية .

أوضحنا أن عدد الأرقام التي يحتاجها الترميز يتوقف على طريقة الترميز . وهكذا يلزمنا عدد أقل من الأرقام الثنائية إذا رمزنا زمراً من الأحرف عوضاً عن ترميز كل حرف على حدة . ونظراً لأن عدد تراكيب الأحرف المعتمدة في اللغة قليل جداً بالمقارنة مع كل تراكيب الأحرف ، فإن الأمر المهم هنا هو أن ترميز الكلمات في نص معين سيستهلك عدداً من الأرقام الثنائية أقل بكثير مما لو رمزنا أحرف النص كل على حدة .

نؤكد ان هناك طرقاً عديدة لترميز الرسائل المتولدة عن مصدر مستقر ، كمصدر للنصوص اللغوية مثلاً . ماذا ستكون الحاجة الفعلية من الأرقام الثنائية لكل حرف أو كلمة ؟ هل سيتحتم علينا تجريب كل أشكال الترميز الممكنة لنقرر أيها الأمثل . ولكن اذا جربنا كل الأشكال الممكنة وانتقينا الأمثل ، فسنبقى في شك من أمرنا ، اذ قد يكون شكل الترميز الأمثل ذلك الذي لم يخطر على بالنا وبالتالي لم نجربه .

الا توجد طريقة احصائية ، على الأقل من حيث المبدأ ، تمكننا من اجراء معايرات احصائية على الرسائل المتولدة عن مصدر معين ، مثل تلك المعايرات ستلفت نظرنا الى قيمة صغرى وسطية لعدد الأرقام الثنائية المقابلة لكل إشارة ، ويمكن استخدام هذه القيمة في ترميز الرسائل .

نعود الى نموذج المصدر المرسل الذي عرضناه في الفصل الثالث واعتبرنا انه مصدر مستقر للرموز كالأحرف أو الكلمات . يتسم المصدر بخصائص إحصائية ثابتة مثل : التواتر النسبي للرموز ، احتمال أن يلي رمز معين رمزاً آخر معلوم أو زوجاً من رمزين محددين ، أو تركيباً من ثلاثة رموز وغير ذلك .

نتحدث في حالة النصوص اللغوية عن التواترات النسبية للكلمات وعن احتمال أن تلي كلمة معينة كلمة أخرى معلومة ، أو زوجاً من الكلمات ، أو تركيباً ثلاثياً منها ، وكذلك تراكيب أعلى .

لقد عمدنا بهدف توضيح الخصائص الاحصائية لسلاسل الأحرف أو الكلمات لشرح كيفية انشاء تراكيب تشبه النصوص اللغوية الطبيعية وذلك باجراء سلسلة من الخيارات العشوائية بين الأحرف والكلمات ، بشرط أن يؤخذ بعين الاعتبار الاحتمالات الخاصة بتلك الأحرف والكلمات ، أو احتمالات سبقها لسلاسل أخرى من الأحرف والكلمات . لقد انجزنا الخيارات العشوائية في هذه الأمثلة برمي حجر الترد أو السحب العشوائي لبطاقة من جعبة أو غير ذلك من العمليات الاحتمالية .



نمارس خيلاً مشابهاً أثناء الكتابة أو القراءة : ماذا سنقول بعد  
أو ماذا ستكون جملتنا التالية . لا نجد في بعض الأحيان أي خيار فني  
اللغة الانكليزية مثلاً إذا كتبنا الحرف Q فعلينا بشكل ملزم ان نكتب  
بعده الحرف U . وبصورة عامة يكون لدينا خيار أكبر لدى محاولتنا  
كتابة الحرف الثاني من كلمة بالمقارنة مع الخيار المتبقي لدى بلوغنا  
منتصف الكلمة . يبرز الخيار ، على الرغم من ذلك ، ويمارس بشكل  
مستمر في كل مصدر للرسائل سواء اكان حياً أو ميكانيكياً . ولولا ذلك  
لكانت كل الرسائل المصدرة مقررة سلفاً بشكل كامل وقابلة للتنبؤ  
الدقيق .

يقابل الخيار الذي يمارسه مصدر الرسائل لدى توليده رسالة  
معينة ، درجة من الرية لدى المستقبل يمكن حلها لدى تفحص الرسالة.  
ان هدف الاتصال ونتيجته الأولى تكمن في حل هذه الرية أو الدرجة  
من الرية .

إذا لم ينطو مصدر الرسائل على أي خيار ، أي اذا لم يكن على  
سبيل المثال بمقدوره ان ينتج إلا سلاسل لا نهاية لها من عنصر مكرر  
هو الواحد ، أو سلاسل لا نهاية لها من عنصر مكرر هو الصفر ، كان  
المستقبل بالمقابل في حل من أي التزام تجاه تفسير الرسالة وتفحصها  
لمعرفة محتواها ، إذ بإمكانه في هذه الحالة وبسلطة التنبؤ بها بشكل  
دقيق وكامل . وهكذا اذا كنا نرغب بقياس المعلومات بطريقة عقلية ،  
كان علينا تبني المعيار الذي يزيد بازدياد الخيارات المطروحة أمام المصدر،  
أي المعيار الذي يزيد بازدياد رية المستقبل إزاء ما سيقوم المصدر  
بتوليده وبثه .

إن لكل مصدر بالطبع ، كمية من الرسائل الطويلة أكثر مما له من  
الرسائل القصيرة . فمثلاً هناك رسالتان ممكنتان تتألف كل واحدة  
منهما من رقم ثنائي واحد ، و٤ تتألف كل منها من رقمين ثنائيين ، و١٦  
في كل منها ٤ أرقام ثنائية ، و٢٥٦ رسالة في كل رسالة ٨ أرقام ثنائية

وهكذا . هل من الواجب علينا أن نقول أن كمية المعلومات إنما بقيسها عدد هذه الرسائل ؟ لتصور أربعة خطوط برقية تستخدم بشكل آني لنقل الأرقام الثنائية وبنفس السرعة ، طبعاً نستطيع باستخدام هذه الخطوط إرسال كمية من الأرقام تساوي أربعة أضعاف ما يمكننا إرساله في حالة خط واحد . إذا كان الأمر كذلك ، إذن لوجب علينا قياس كمية المعلومات بدلالة عدد الأرقام الثنائية عوضاً عن عدد التراكيب المختلفة التي يمكن للأرقام الثنائية تشكيلها، وهذا يعني بالتالي أن كمية المعلومات يجب ألا تقاس بعدد الرسائل الممكنة ، بل بلوغاريتم هذا العدد .

إن قياس كمية المعلومات كما تطرحه نظرية الاتصالات تؤمن ذلك ، وهو أمر منطقي إذا نظر إليه من جوانب أخرى أيضاً . يدعى مقياس كمية المعلومات بالانتروبي . إذا رغبتنا بفهم الانتروبي كما تطرحها نظرية الاتصالات فعلينا تناسي الانتروبي التي تقدمها الفيزياء . وعندما نتفهم الانتروبي الخاصة بنظرية الاتصالات ، فلن يكون هناك أي ضرر إذا حاولنا ربطها بالانتروبي الفيزياء ، وإن كانت أدبيات الفيزياء تؤكد أن المغامرين الذين حاولوا ذلك لم يستطيعوا الخروج من الفوضى التي خلقها خلط الأفكار بين انتروبي الفيزياء والانتروبي للاتصالات .

تقاس انتروبي الفيزياء بوحدة البيت Bit . وهكذا نتحدث عن انتروبي مصدر رسائل معين على أنه مساوٍ لكل بيت لكل حرف ، أو لكل كلمة ، أو لكل رسالة . إذا كانت سرعة توليد المصدر للرموز ثابتة، أمكننا القول أن هذا المصدر يملك انتروبي تساوي لكل بيت في الثانية .

تزداد الانتروبي بازدياد عدد الرسائل التي يمكن للمصدر إجراء الخيار بينها ، وهي تزداد أيضاً بازدياد حرية الخيار ( أو بازدياد رتبة المستقبل ) وتتناقص بازدياد الحدود المفروضة على حرية الخيار والرتبة . فمثلاً حصر بعض الرسائل سواء بالإقلال من إرسالها أو تكرارها كثيراً سينقص حرية الخيار لدى المصدر. وكذا الرتبة لدى المستقبل ، والنتيجة هي انخفاض الانتروبي .

لا شك سيكون أمراً متميزاً أن نوضح الانتروبي أولاً بمثال . تعامل نظرية الاتصالات الرياضية مصدر الرسائل على أنه مصدر مستقر حيث يتم إنتاج سلاسل من الإشارات هي إلى حد ما غير قابلة للتنبؤ . يجب أن نتخيل المصدر وهو ينتقي إحدى الرسائل بوسائط غير قابلة للتنبؤ أي عشوائية ، ولعل أبسط شكل للتنبؤ ذاك الذي يفترض وجود رمزين فقط س ، ص يقوم المصدر وبشكل متكرر بإجراء الخيار بينهما وبشكل مستقل أي أن الخيار الحالي غير مرتبط بالخيارات السابقة . لا نعلم في هذه الحالة إلا أن الرمز س يمكن أن يختار باحتمال ح ، و ص يمكن أن يختار باحتمال ح ، تماماً كما في حالة قذف قطعة نقد معدنية . يمكن للمستقبل أن يكتشف هذه الاحتمالات بتفحص سلاسل طويلة يولدها المصدر مكونة من هذين الرمزين س ، ص . يجب أن تبقى القيمتان ح ، ح ثابتتين مع الوقت إذا كان المصدر مستقراً .

تساوي الانتروبي في هذه الحالة البسيطة :

$$T = - (ح. ح. + ح. ح) \text{ لـ ح } (1) \quad \text{بيت لكل رمز}$$

وهكذا تساوي الانتروبي الماكس بالإشارة لمجموع حدين هما : احتمال اختيار الرمز س مضروباً بلوغاريتمه واحتمال اختيار الرمز ص مضروباً بلوغاريتمه .

إن السبب الحقيقي لتعريف الانتروبي على هذا النحو للحالة البسيطة وفي الحالات الأعم لن يتضح مهما حاولنا بناء حجج معقولة ، وواقع الأمر أن الوضوح المنشود لن يتحقق إلا من خلال تقدمنا المطرد في البحث ، لذا فإن تبرير العلاقة الأخيرة سيؤجل إلى مرحلة لاحقة . نستذكر أن اللوغاريتم يؤخذ بالنسبة لأسس مختلفة ، والأساس المعتبر للوغاريتم في نظرية المعلومات هو الأساس ٢ . يوضح الجدول التالي بعض خواص اللوغاريتم .

الكسر	طريقة ثانية في كتابته	طريقة ثالثة في كتابته	لوغاريتمه
$\frac{3}{4}$	$\frac{1}{\frac{15}{2}}$	$\frac{1}{2}$	$0.415 -$
$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{12}$	$\frac{1}{2}$	$1 -$
$\frac{3}{8}$	$\frac{1}{\frac{15}{2}}$	$\frac{1}{2}$	$0.415 -$
$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{22}$	$\frac{2}{2}$	$2 -$
$\frac{1}{8}$	$\frac{1}{32}$	$\frac{3}{2}$	$3 -$
$\frac{1}{16}$	$\frac{1}{42}$	$\frac{4}{2}$	$4 -$
$\frac{1}{64}$	$\frac{1}{62}$	$\frac{6}{2}$	$6 -$
$\frac{1}{256}$	$\frac{1}{82}$	$\frac{8}{2}$	$8 -$

يمرّف لوغاريتم العدد من الأساس ٢ على أنه القوة التي إذا رفع عليها العدد ٢ حصلنا على العدد المعتبر..

لنتخيل مصدراً للرسائل ينطوي على قذف قطعة نقد معدنية .  
ولتكن س ممثلة ( الطرة ) و ص ممثلة ( للنقش ) . عندها يتساوى  
الاحتمالان ح . ، ح١ ، ويكون : ح . = ح١ =  $\frac{1}{2}$  أي أن احتمال الطرة مثل  
احتمال النقش ويساوي كل من الاحتمالين  $\frac{1}{2}$  .

تساوي الانتروبي في هذه الحالة ووفق علاقتنا السابقة :

$$ت = - ( \frac{1}{2} \text{ لع } \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \text{ لع } \frac{1}{2} )$$

$$= - ( \frac{1}{2} \times ١ + \frac{1}{2} \times ١ )$$

$$= - ( \frac{1}{2} + \frac{1}{2} ) = ١ \text{ بيت لكل رمية لقطعة النقد :}$$

إذا ولد مصدر الإرسال سلسلة مكونة من ( الطرة ) و ( النقش )  
ناجمة عن رمي قطعة النقد فإن الأمر يستلزم بيت واحدة من المعلومات  
لنقل رسالة تفيد عن ظهور الطرة أو النقش .

لنلاحظ الآن أننا نستطيع تمثيل خرج ( رميات متتالية لقطعة النقد  
بواسطة أرقام ثنائية تساوي في عددها عدد الرميات الواقعة ، ونختار ١  
لتمثيل الطرة و ٠ لتمثيل النقش . وهكذا وفي هذه الحالة على الأقل ،  
يتساوى الرقم الدال على الانتروبي : ١ بيت لكل رمية مع الرقم الدال  
على الأرقام الثنائية اللازمة لتمثيل الخرج في كل رمية وهو ١ رقم ثنائي  
للمية ، أي يتساوى في هذه الحالة عدد الأرقام الثنائية الضرورية لنقل  
الرسائل التي يولدها المصدر (تتالي الطرة والنقش) مع انتروبي المصدر.  
نفرض الآن أن المصدر يولد سلسلة مكونة من ٠ و ١ باستخدام  
قطعة نقد خاصة تظهر النقش في  $\frac{1}{4}$  الحالات والطرّة في  $\frac{3}{4}$  الحالات .  
يكون لدينا في هذه الحالة :

$$١٣ = \frac{1}{4} \text{ ح.} = \frac{1}{4}$$

$$ت = - ( \frac{1}{4} \text{ لع } \frac{1}{4} + \frac{3}{4} \text{ لع } \frac{3}{4} )$$

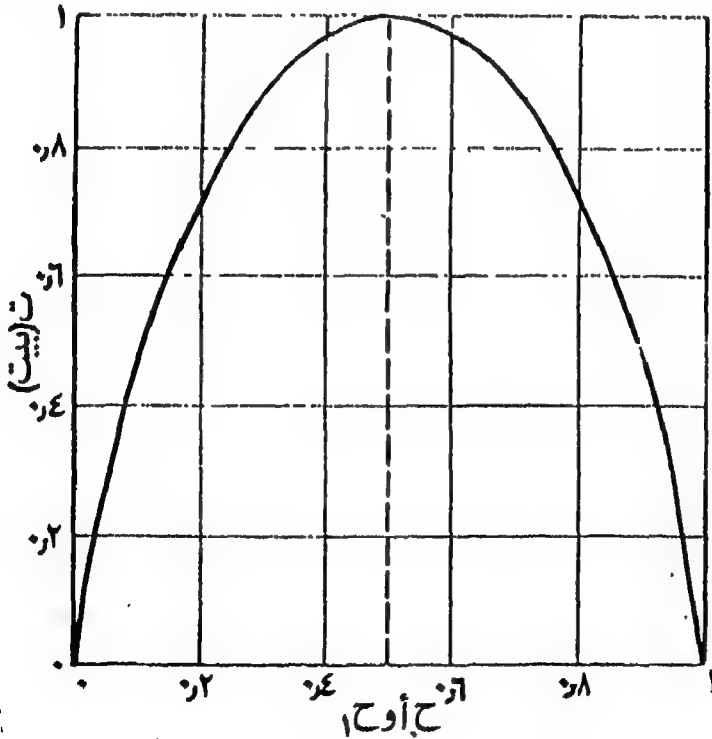
$$= - ( \frac{1}{4} \times ٢ + \frac{3}{4} \times ١.٥٨١٥ )$$

$$= ١.٨١١ \text{ بيت لكل رمية}$$

نشعر أنه باستخدامنا قطعة النقد الخاصة هذه تزداد معرفتنا  
بالخرج بالمقارنة مع قطعة النقد السابقة . وأكثر من ذلك ، فتقييدنا  
بالحصول على النقش بأكثر من حصولنا على الطرة يقلل من الخيارات  
الممكنة التي توافرت عندما كان احتمال حصولنا على الطرة مساوياً  
لاحتمال حصولنا على النقش . يبدو أن هذا صحيح فعلاً لأنه إذا  
ارتفع احتمال النقش إلى ١ وانخفض احتمال الطرة إلى صفر ، لانعدمت  
الخيارات أمامنا بشكل كامل . وكما رأينا في حالة قطعة النقد الخاصة

فإن الانتروبي تساوي ٨.١١. بيت لكل رمية . نتصور عند هذه المرحلة أنه يجب أن تتوفر لدينا القدرة على تمثيل الخرج الخاص برميات قطعة النقد الخاصة المفترضة بعدد أقل من الأرقام الثنائية لكل رمية إلا أنه ليس واضحاً كم يلزمنا من الأرقام الثنائية .

إذا كان احتمال ورود النقش ح ، كان احتمال ورود الطرة ح .  $1 - ح = ح$  . وهكذا تتوقف معرفتنا لأحد الاحتمالين على معرفتنا الاحتمال الآخر . يمكننا استناداً إلى ذلك حساب قيم متعددة لـ ت مقابلة لقيم مختلفة لـ ح . ومن ثم توقيع منحنياً بيانياً يربط بين ح ، ت . يوضح الشكل ٥ - ١ هذا المنحني حيث تصل ت إلى قيمتها العظمى من أجل ح =  $\frac{1}{2}$  ، بينما تصبح ت مساوية للصفر من أجل قيمتين لـ ح هما : ١ ، ٠ . أي عندما يقتصر الإصدار على أحد الرمزين دون الآخر .



الشكل ٥ - ١

لا يهم اذا اعتبرنا ان الرمز س هو الطرة وص هو النقش او العكس  
لذا يكون المنحني المثل لارتباط ت مع ح هو نفسه المثل لارتباط ت  
مع ح ١ وهذا ما يؤيده تناظر المنحني في الشكل ٥ - ١ بالنسبة للخط  
الشاغولي المنقط .

يمكن لمصدر الارسال ان ينتج خيارات متتالية من بين الارقام  
العشرية العشرة ، او من بين الاحرف الابجدية ، او من بين آلاف الكلمات  
من قاموس لغة معينة . نعتبر حالة توليد المصدر لرمز او كلمة من  
بين عدد من الرموز او الكلمات مساو ل ن ، وباحتمالات مستقلة عن  
الخيارات السابقة .

$$\begin{array}{ccccccc} & & & & & & \text{ن} \\ & & & & & & \text{ت} = \text{ح} - \text{ح} \\ & & & & & & \text{م} = \text{م} - \text{م} \\ & & & & & & \text{م} = \text{م} - \text{م} \\ & & & & & & \text{م} = \text{م} - \text{م} \end{array}$$

يعني الرمز ح هنا اجراء عملية الجمع لكل الحدود الناجمة عن  
اعتبار كل قيم الحصول على الرمز الذي ترتيبه م . اذا فرضنا ن = ٢  
فاننا نعود ببساطة الى الحالة المعتبرة سابقا .

نضرب مثالا بهدف الايضاح . نفرض اننا نرمي قطعتي نقد في وقت  
واحد ، واذا ذاك نحصل على اربع امكانات مختلفة للخروج نميزها بالاعداد  
١ ، ٢ ، ٣ ، ٤ وفق ما يلي .

١	طرة	طرة
٢	نقش	طرة
٣	طرة	نقش
٤	نقش	نقش

وبدا يكون احتمال كل شكل من اشكال الخرج مساويا  $\frac{1}{4}$  ، وبالتالي  
تساوي الانتروبي في هذه الحالة :

$$\text{ت} = - \left( \frac{1}{4} \log \frac{1}{4} + \frac{1}{4} \log \frac{1}{4} + \frac{1}{4} \log \frac{1}{4} + \frac{1}{4} \log \frac{1}{4} \right)$$

$= - ( \frac{1}{4} - \frac{1}{4} - \frac{1}{4} - \frac{1}{4} ) = 2$  بيت لكل رمية مزدوجة يحتاج الامر كمية من المعلومات تساوي 2 بيت لتوصيف او نقل خرج عملية رمي قطعتي نقد في وقت واحد . وكما في حالة رمي قطعة نقد واحدة يتساوى فيها احتمال ورود الطرة مع احتمال ورود النقش ، نستطيع في حالتنا الجديدة هذه استخدام رقمين ثنائيين لتوصيف خرج رمي القطعتين اذ نربط رقم ثنائي بكل قطعة على حدة . يفضي كل هذا الى امكانية بث الرسالة المولدة في حالتنا هذه ( رمي قطعتي النقد ) باستخدام عدد من الارقام الثنائية مساوٍ للانتروبي .

اذا توفر لدينا مجموعة من الرموز عددها  $n$  متكافئة في احتمال ظهورها ، كان ذلك الاحتمال مساوياً  $\frac{1}{n}$  . يكون لدينا في هذه الحالة

عدد من الحدود يساوي  $n$  ، حيث يساوي كل حد بدوره الى  $\frac{1}{n}$  لع  $\frac{1}{n}$

$$ت = - \text{لع} \frac{1}{n} = \text{لع} n \text{ بيت لكل رمز}$$

مثلاً، عندما نرمي حجر النرد ، يتساوى احتمال ظهور أي من وجوهه مع احتمال ظهور أي وجه آخر ، وهذا الاحتمال هو  $\frac{1}{6}$  ، وتكون الانتروبي في هذه الحالة - لع  $\frac{1}{6} = 2.58$  بيت لكل رمية .

وبصورة عامة نفترض اننا اخترنا في كل مرة وباحتمالات متساوية عدداً ثنائياً من مجموعة اعداد ثنائية يتكون كل منها من  $h$  رقم ثنائي . ولما كان هناك  $2^h$  من هذه الاعداد ، نحصل على :

$$ن = 2^h \quad \text{لع} \frac{1}{n} = \text{لع} \frac{1}{2^h} = \text{لع} 2^{-h} = -h$$



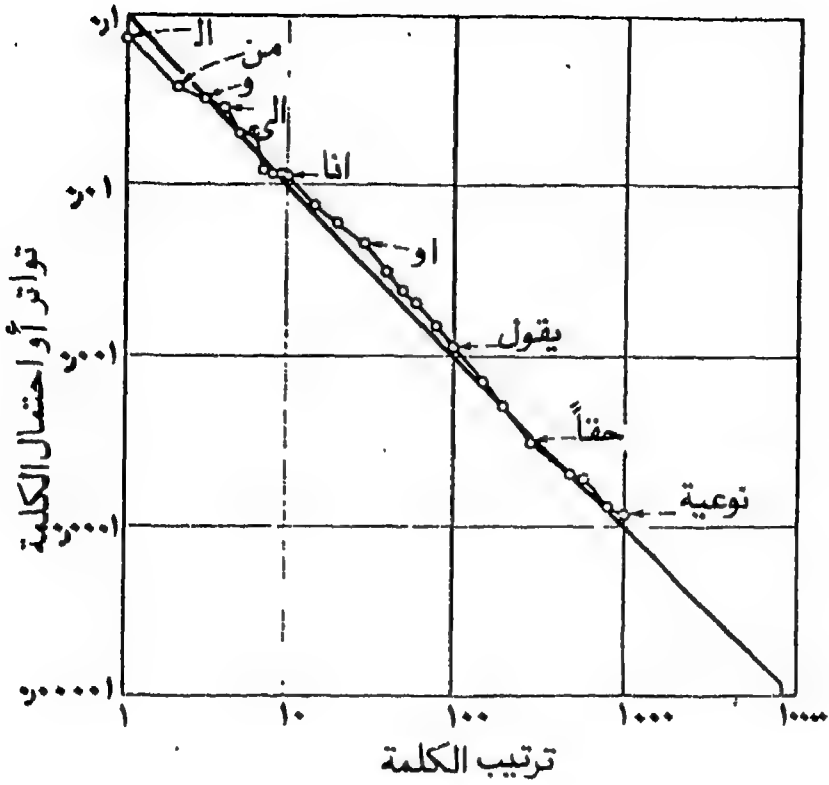
وهكذا فمن أجل مصدر يولد عند كل خيار وينفس الاحتمال عددا ثنائيا مكونا من ( هـ ) رقم ثنائي ، تكون الانتروبي مساوية لـ هـ بيت لكل عدد . ان الرسالة التي يولدها المصدر هنا عبارة عن عدد ثنائي يمكن تمثيله بالطبع بارقام ثنائية ؛ وايضا تمثل هذه الرسالة بعدد من الارقام الثنائية يساوي لانتروبي الرسالة مقاسة بالبيت . يوضح هذا المثال كيف ان على اللوغاريتم ان يكون التابع الرياضي ذي الدور الرئيسي في تعريف الانتروبي .

تختلف في الحالة العادية ، احتمالات توليد المصدر للاشارات باختلاف الاشارة المولدة . نأخذ كمثال مصدرا مرسلا يولد الكلمات من اللغة الانكليزية بحيث يستقل ورود كل كلمة جديدة عما قبلها ولكن بالاخذ بعين الاعتبار لاحتمالات ورود الاحرف في النصوص الانكليزية وهو ما اشرنا اليه على انه التقريب الاول في الفصل الثالث .

اذا ربنا كلمات الانكليزية وفق تواتر ورودها الشائع ، تقع الكلمات الاكثر تواترا في المقام الاول اي تعطى الرقم ١ مثل كلمات ( the, in fact ) بينما الكلمات التالية في التواتر تعطى الرقم ٢ مثل كلمة of ، وهكذا فاحتمال الكلمة ذات الترتيب ر ( اذا لم تكن ر كبيرة جدا ) هو :

$$\frac{1}{r} = C_r$$

يوضح الشكل ٥ - ٢ المخطط البياني لهذه العلاقة النظرية ممثلا بالخط الاسود الممتد من اعلى اليسار الى اسفل يمين الشكل ، كما يوضح التقارب الشديد بين هذا الخط النظري والنقاط الموقعة بشكل تجريبي ، وتعرف هذه العلاقة باسم علاقة زيف وستعرض لها في الفصل السابع ، بينما سنكتفي هنا باستخدامها .



الشكل ٥ - ٢

نستطيع أن نبرهن على أن هذه العلاقة ليست صحيحة بالنسبة لكل الكلمات ، ويتضح ذلك إذا اعتبرنا رمي قطعة النقد المعدنية إذا تساوى احتمال ظهور الطرة والنقش وكان كل منهما مساوياً  $\frac{1}{2}$  ، فلن يكون هناك خرج ممكن آخر لأن  $\frac{1}{2} + \frac{1}{2} = 1$  . أما إذا كان احتمال أن تقف قطعة النقد على حافتها غير مساوي للصفر ، كان يساوي  $\frac{1}{10}$

مثلاً ، فنتوقع عندها أنه في حالة ١٠٠ رمية يمكن ان تظهر الطرة في ٥٠ من الحالات وان يظهر النقش في ٥٠ حالة اخرى ، وان تقف القطعة على حافتها في عشرة حالات . يظهر هذا وكأنه مضحك ، اذ يجب ان يكون مجموع كل الاحتمالات مساوياً الواحد . لنلاحظ انه اذا اضعنا الاحتمالات التي تعطيها العلاقة السابقة : ح ١ ثم ح ٢ ثم .....  
 ح  
 فسنجد ان المجموع سيصبح مساوياً الواحد عند اضافة ٨٧٢٧ .  
 اذا قبلنا هذه الحقيقة كما هي ، فنصل الى نتيجة مفادها انه لا يمكننا ان نستخدم اي كلمة بعد ذلك . واقع الامر ان العلاقة الاخيرة تقريبية الى حد ما .

ومهما يكن من امر فالخطأ المرتكب ليس كبيراً ، وقد استخدم شانون هذه العلاقة في حساب الانتروبي الخاصة بمصدر رسائل يولد الكلمات بشكل مستقل ولكن بالاخذ بعين الاعتبار لاحتمالات ورودها في النصوص الانكليزية ، ولكي يحافظ على القيمة النظرية لمجموع الاحتمالات وهي ١ ، فقد اعتبر الكلمات الـ ٨٧٢٧ الأكثر شيوعاً في اللغة الانكليزية وحسب الانتروبي استناداً لذلك فوجدها مساوية لـ ٩١١٤ بيت لكل كلمة .

وجدنا في الفصل الرابع انه يمكن ترميز النصوص الإنكليزية حرفاً بحرف باستخدام ٥ ارقام ثنائية لكل حرف أو ٢٧٥ رقم ثنائي لكل كلمة ، كما استعرضنا كيفية استخدام السلاسل المختلفة من الأرقام الثنائية لترميز ١٦٣٥٧ كلمة و ٢٦ حرف وفراغ واحد ، وأن توظيف ١٤ رقم ثنائي لكل كلمة يفرض ترميز النصوص الإنكليزية . يصل بنا ذلك الى حالة من التشكيك فيما اذا كانت الانتروبي تعطي فعلاً عدد الأرقام الثنائية اللازمة ، إذ كما اسلفنا ، يشير حساب شانون المستند الى الاحتمالات النسبية لكلمات اللغة الإنكليزية الى أن ٩١١٤ رقم ثنائي لكل كلمة يكفي فعلاً .

اما خطواتنا التالية في طريق اكتشاف عدد الأرقام الثنائية اللازمة لترميز رسالة يولدها مصدر مرسل فتتضمن عرض نظرية مذهشة برهنها شانون تتعلق بالمصادر المستقرة حيث تجري خيلرات مستقلة وفق احتمالات معينة للأحرف أو الكلمات .

نعتبر كل الرسائل التي يمكن للمصدر أن يولدها والتي تتألف من عناصر معينة تضم عدداً كبيراً من الاحرف . مثلاً الرسائل التي تتكون كل منها ١٠٠٠٠ رمز (احرف ، كلمات ، ... الخ) ، وبصورة أعم الرسائل المكونة من  $n$  حرف . إن بعض هذه الرسائل محتمل أكثر من الرسائل الأخرى . يرد الرمز الأول في الرسائل المحتملة :  $h_1 \times n$  ، بينما يرد الرمز الثاني  $h_2 \times n$  وهكذا . إذن يرد كل رمز في الرسائل المحتملة وفق التواتر المميز للمصدر . وعلى الرغم من ذلك فيمكن للمصدر توليد أنواع أخرى من الرسائل ، كان يصدر رسالة مكونة من رمز واحد مكرر بشكل لا نهائي ، أو ان يصدر الرموز بغير تواترات ورودها المشار إليها ، إلا أن هذا المصدر قلما يفعل ذلك .

ان الحقيقة الهامة هي انه إذا كانت  $T$  هي انتروبي المصدر ،

ت ن

فسيكون هناك بالضبط حوالي ٢ رسالة محتملة ، أما الرسائل المتبقية الأخرى فسيكون احتمال ورودها صغيراً بدرجة يمكن اهماله . وبعبارة أوضح ، اذا صنفنا الرسائل من أكثرها احتمالاً الى أدناها احتمالاً ،

ت ن

وربطنا بالرسائل الأكثر احتمالاً التي عددها ٢ أعداداً ثنائية عددها  $T$  ، فسنكون على يقين من أن كل رسالة مكونة من  $n$  رمز سيولدها المصدر بشكل فعلي لا شك سيقابلها عدد معين .

نلجأ لتوضيح هذه الأفكار الى حالات خاصة بسيطة . نفرض ان الرموز المنتجة هي . ١ ، ٠ . إذا تساوى احتمال هذين الرمزين وكان كل منهما مساوياً  $\frac{1}{2}$  ، كانت الانتروبي كما رأينا مساوية لـ ١ بيت لكل رمز . نفرض ان المصدر يولد رسائل يساوي طولها ١٠٠٠ رقم ٢ فيكون

١٠٠٠

الجداء  $T = 1000$  ووفق نظرية شانون يجب ان يكون هناك ٢ رسالة محتملة .

١٠٠٠  
 ان استخدام ١٠٠٠ رقم ثنائي يمكننا من كتابة ٢ عدد ثنائي .  
 وهكذا فلتحديد رقم ثنائي مختلف لكل رسالة محتملة علينا استخدام  
 اعداد ثنائية يتكون كل منها من ١٠٠٠ رقم ثنائي . وهذا ما توقعناه  
 بالضبط . فلنحدد للمستقبل أي الاعداد الثنائية المكونة من ١٠٠٠  
 رقم ثنائي يقوم المصدر بتوليدها ، علينا بث رسالة مكونة من ١٠٠٠  
 رقم ثنائي .

نفرض ان الارقام المكونة للرسائل التي يولدها مصدر الرسائل يتم  
 اختيارها إثر رمي قطعة نقد احتمال الطرة فيها  $\frac{1}{2}$  واحتمال لنقش  $\frac{1}{2}$  ،  
 وهكذا فالرسائل النموذجية المتولدة عن هذا المصدر تحوي من ال ١ اكثر  
 مما تحوي من ال ٠ ، إلا ان هذا ليس كل ما في الامر . رأينا ان الانتروبي  
 في هذه الحالة هي ٨.١١ ر. بيت لكل رمية ، وإذا اعتبرنا مرة أخرى  
 مساوية لـ ١٠٠٠ ، أي أن طول كل رسالة هو ١٠٠٠ رقم ثنائي ، فيكون  
 الجداء ن ت مساوياً لـ ٨١.١ ، وبينما كان عدد الرسائل الممكنة سابقاً هو  
 ١٠٠٠ ٨١.١  
 ٢ أصبح في هذه الحالة ٢ فقط .

٨١.١  
 ان استخدام ٨١.١ رقم ثنائي يمكننا من كتابة ٢ عدد ثنائي حيث  
 نستطيع ربط كل واحد من هذه الاعداد لكل رسالة ممكنة قوامها ١٠٠٠  
 رقم ثنائي تاركين الرسائل الغير ممكنة والتي عددها ١٠٠٠ دون ترقيم .  
 وهكذا يمكننا أن نرسل الى المستقبل ما يدل على الرسالة ذات الطول  
 ١٠٠٠ رقم التي يولدها المصدر ببت ٨١.١ رقم ثنائي فقط . ويبقى احتمال  
 أن يولد المصدر إحدى الرسائل غير المحتملة مهملاً بدرجة كافية .  
 لا نستطيع تقديم ضمانات مطلقة فيما يخص معالجاتنا حتى الآن ، فمصدر  
 ٨١.١  
 الرسائل قد يولد رسالة غير مقرونة بعدد من بين اعدادنا ال ٢ المكونة  
 من ٨١.١ رقم ثنائي . لا نستطيع في هذه الحالة بث الرسالة ، على الأقل  
 باستخدام ٨١.١ رقم ثنائي .

نصادف مرة أخرى ما يؤكد لنا أن عدد الأرقام الثنائية اللازمة لبث رسالة ما يساوي حاصل ضرب الانتروبي مقدرة بالبيت لكل رمز في عدد الرموز . يجدر بنا أن نتذكر أننا حققنا في ايضاحنا الأخير بثاً اقتصادياً بترميز التراكيب ، أي باعتبار رسالة من ألف رقم وأكثر ومن ثم ترميزها برمز خاص ، وكذلك ترميز الرسائل المماثلة باستخدام ٨١٠١ رقم ثنائي .

ما مدى صحة هذا الافتراض ؟

لقد عالجتنا حتى الآن الحالات التي يولد فيها مصدر الإرسال الرموز المختلفة ( أعداد ، أحرف ، كلمات ) بشكل مستقل عن الرموز التي ولدها في مرحلة سابقة . أن هذا الأسلوب لا يتفق وطريقة إنشاء النصوص اللغوية ، فإلى جانب القيود الإحصائية على تواتر الكلمات ، هناك قيود أخرى على ترتيب الكلمات ، لذا سيكون الخيار أمام الكاتب عند كتابته كلمة جديدة أقل مما لو كانت الفرصة متاحة أمامه لانتقاء هذه الكلمة بشكل مستقل عما سبقها .

كيف يمكن أن نعالج مثل هذه الحالة . نجد مفتاح الحل في طريقة ترميز التراكيب التي شرحناها في الفصل الرابع والتي استعدناها مرة ثانية في المثال الأخير . إذا كان المصدر مستقراً فيعتمد الحرف التالي على واحد أو أكثر من الأحرف الخمسة السابقة وليس على الأحرف التي تسبق هذه المجموعة . يوضح التقريبان الثاني والثالث المقدمان في الفصل الثالث كيفية توليد نص وفق هذه الطريقة . إذا اعتبرنا عملية مستقرة ما أي عملية المسؤول الأول فيها هو مصدر مستقر ، وكانت تلك العملية من النوع القابل للنمذجة الرياضية ، لوجب أن يكون تأثير الماضي على الرموز الجديدة المتولدة متناقصاً كلما كان ذلك الماضي أبعد . ينطبق ذلك على توليد النصوص اللغوية ، وعلى الرغم من أنه يمكننا تصور حدوث العكس ( كأن نستخدم نفس الاسم لشخصيات رواية ما ) ، فإن الكلمات التي اكتبها الآن تعتمد على ما كتبتة سابقاً قبل عشرة آلاف كلمة من موقع الكلمة المعنية .

نفرض الآن اننا نجزي الرسالة قبل ترميزها الى تراكيب طويلة من الرموز . اذا كانت هذه التراكيب طويلة بما فيه الكفاية فسيقتصر تأثير الرموز من تركيب سابق على الرموز الاولى فقط من التركيب التالي ، واذا زدنا في طول التراكيب كثيراً ، فان عدد الرموز المتأثرة تلك سيكون مهماً بالمقارنة مع عدد الرموز في كل تركيب . يؤهلنا ذلك لحساب انتروبي كل تركيب ولتحقيق هذا الحساب نفرض احتمال التركيب ذي الترتيب  $m$  هو :  $C(b, m)$  ، و ستكون الانتروبي معطاة بالعلاقة :

$$T = - \sum C(b, m) \times \log C(b, m) \text{ بيت لكل تركيب}$$

سيمترض اي رياضي على تسمية هذه الكمية بالانتروبي ، وبدلاً من ذلك سيقول انها ستقرب من الانتروبي بقردياد طول التراكيب ، اي بتضمينها اعداداً اكبر من الرموز . لذا علينا ان نفترض اننا سنزيد من طول التراكيب لنقرب اكثر واكثر من القيمة الحقيقية للانتروبي . وفي اطار هذا الشرط نستطيع ان نحسب الانتروبي لكل رمز ، بأن تقسم انتروبي على عدد الرموز الواردة في التراكيب  $n$  ، اي :

$$T(\text{الرمز}) = \frac{1}{n} \sum C(b, m) \times \log C(b, m) \text{ بيت لكل رمز}$$

تؤدي حسابات الانتروبي في غالبية الاحيان الى قيم عالية اذا لم تأخذ بعين الاعتبار العلاقات بين الرموز وهكذا اذا زدنا  $n$  في العلاقة الاخيرة بشكل مطرد اقتربنا باستمرار من القيمة الحقيقية للانتروبي .

لقد قررنا منذ البداية ان تعريف كمية المعلومات يجب ان يتسق مع فكرة بث عدة رسائل منفصلة عبر اسلاك مختلفة بحيث تساوي الكمية الاجمالية للمعلومات المرسله مجموع الكميات المرسله عبر كل سلك على حدة . وهكذا فللحصول على الانتروبي بجملة مصادر مستقلة عاملة في نفس الوقت ما علينا الا جمع الانتروبي لكل مصدر . نذهب

ابعد من ذلك ونفترض ان المصدر يعمل بشكل متقطع عندها يجب أن  
نضرب سرعة انبثاق المعلومات عنه او الانتروبي الخاصة به بالنسبة المئوية  
لوقت عمله وذلك بغية الحصول على قيمة وسطية لسرعة اصداره  
للمعلومات .

نفرض جدلاً أنه لدى ارسالنا سلسلة من الاحرف التكلزية مثل  
TH كان لدينا مصدر ارسال وحيد . يكون احتمال ورود الحرف E  
في الاصدار التالي عالياً جداً في هذه الحالة . وقد أصبح لدينا مصدر  
ارسال آخر عند بثنا لزوج الاحرف NQ . يكون احتمال ورود الحرف  
U . في هذه الحالة مساوياً الواحد . لنحسب الانتروبي لكل من هذين  
المصدرين . نشير الى انتروبي كل مصدر بالرمز  $\mu$  ، ثم نضرب هذه

الانتروبي بالعدد ح ( ب ) الدال على احتمال عمل ذلك المصدر ( أي  $\mu$

بنسبة الفترة التي يعمل ذلك المصدر خلالها ) ثم نجمع كل الارقام  
الناتجة لنحصل على متوسط الانتروبي او اجمالي سرعة المصدر الذي  
هو عبارة عن اتحاد عدة مصادر يعمل كل منها لفترة زمنية محددة .  
نعتبر كمثال مصدراً ينطوي على احتمالات أزواج فقط ، أي أن مجمل  
تأثير الماضي ينحصر في الحرف الاخير الصادر فلكل حرف تواتر وروده  
كالحرف E يتواتر ١٣ ٪ ، و كالحرف W تواتر وروده ٢ ٪ .

نصيغ كل ما تقدم في لغة رياضية متماسكة فنفرض أن تركيباً معيناً  
مكوناً من ن رمز قد تم توليده من قبل المصدر ، فاذا رمزنا لهذا التركيب  
بالرمز  $\mu$  نصلح على احتمال أن يكون الرمز التالي هو س بالرمز  $\mu$

ح ( س )  
 $\mu$



يعتبر هذا المصدر عاملاً فقط عندما يصدر تركيب ما عنه ، تساوي  
الانتروبي الخاصة به في هذه الحالة :

$$- \quad \begin{array}{ccccccc} & & \text{ح} & ( \text{س} ) & \text{ل} & \text{ح} & ( \text{س} ) \\ & & \text{ل} & \text{ب} & \text{ل} & \text{ب} & \text{ل} \\ & & \text{م} & & \text{م} & & \text{م} \end{array}$$

حيث اعتبرنا هنا صدور التركيب ب المكون من ن رمز وتم اجراء الجمع  
لكل الرموز بدءاً من ل = ا وحتى ل = ن .

ولكن ماهي نسبة الفترات التي يعمل خلالها هذا المصدر . تعتبر  
بالنسبة لهذا المصدر فترة عمل تلك الفترة التي يصدر خلالها تركيب  
مكون من ن رمز وليس أي نوع آخر من التركيب . وهكذا اذا دعونا  
احدى هذه الفترات الخاصة بالتركيب ب بتسمية مثل ح ( ب ) ،  
واخذنا بعين الاعتبار كل التراكيب المكونة من ن رمز ، نحسب مجموع  
الانتروبي لكل منها على حدة ، ونعتبر توليد كل تركيب على انه مصدر  
بالتركيب الخاص ب من ن رمز الذي سبق اختيار الرمز س ل ، تكون  
الانتروبي المطلوبة :

$$\text{ت} = - \quad \begin{array}{ccccccc} & & \text{ح} & ( \text{ب} ) & \text{ح} & ( \text{س} ) & \text{ل} & \text{ح} & ( \text{س} ) \\ & & \text{ل} & \text{م} & \text{ل} & \text{ب} & \text{ل} & \text{ب} & \text{ل} \\ & & \text{م} & & \text{م} & & \text{م} & & \text{م} \end{array}$$

يعني ارتباط الرمزين م ، ل اشارة التجميع مساهمة كل الحدود  
المدلية بأحد الدليلين م ، ل في المجموع المذكور .

اذا زدنا عدد الرموز ن السابقة للرمز س ل بحيث يصبح كبيراً جداً  
تقترب القيمة ت بشكل مطرد من انتروبي المصدر . واذا لم يكن هناك  
أي تأثيرات احصائية صادرة عن مصادر تبعد عن الرمز المعتبر بأكثر من  
ن رمز كانت ت هي قيمة الانتروبي الحقيقية ( تصح هذا الحالة من  
اجل مصدر يولد الأزواج وقيمة ل ن = ا ، و مصدر يولد التراكيب  
الثلاثية وقيمة ل ن = ٢ ) .

يكتب شانون العلاقة الأخيرة بشكل مختلف قليلا . ان حاصل ضرب احتمال اصدار التركيب المعني ح ( ب م ) في احتمال ورود الرمز

س بعد التركيب ب :  $\sum_{\text{م}} (س ل) \text{ يساوي احتمال اصدار التركيب ب متبوع بالرمز س وهو وافق شانون : ح ( ب م ، س ل ) ، وبهذا تصبح العلاقة الأخيرة على الشكل :$

$$ت = - \sum_{\text{ل ، م}} \text{ح ( ب م ، س ل )} \cdot \text{الع } \sum_{\text{م}} (س ل)$$

اعتبرنا في الفصل الثالث الآلة المتناهية الحالات كذلك التي وضعها الشكل ٣ - ٣ ، كمصدر للنصوص . يمكننا ان نستند في حساب الانتروبي الى هذه الآلة حيث نعتبر كل حالة من حالاتها كمصدر للرسائل ونحسب الانتروبي المقابلة ، ثم نضربها باحتمال ان تصبح الآلة في تلك الحالة وتجمع كل الحدود الماثلة لنحصل على القيمة الإجمالية للانتروبي

ننتقل الى الصياغة الرمزية لهذه الافكار . نفرض انه عندما تكون الآلة في الحالة م ، يكون بمقدورها ان تصدر الرمز ل باحتمال مقداره ح ( ل ، م ) ، فاذا كانت الآلة مثلا في الحالة التي نرمز لها بالعدد ١ فقد يكون بمقدورها اصدار الرمز : ل = ٣ باحتمال قدره ٣٪ وهكذا نكتب :

$$\text{ح } ١ (٣) = ٣\%$$

تساوي الانتروبي الكلية للحالة م للآلة مجموع كل انتروبي مقابلة لاصدار رمز معين ل اي :

$$ت_{\text{م}} = - \sum_{\text{ل}} \text{ح ( ل ، م )} \cdot \text{الع } \text{ح ( ل ، م)}$$

نصطلح الآن على ان لالة احتمال  $\mu$  ان تكون في الحالة  $\mu$  ، وهكذا  
تكون انتروبي الالة لكل رمز ، على اعتبار ان الالة مصدر للرموز :

$$N = \sum_{\mu} \mu \log \frac{1}{\mu} \quad \text{بيت لكل رمز}$$

نعيد كتابة ذلك بالشكل التالي :

$$N = - \sum_{\mu} \mu \log \mu = \sum_{\mu} \mu \log \frac{1}{\mu} \quad \text{بيت لكل رمز}$$

مرة اخرى ، يعني ارتباط الدليلين  $\mu$  ، ل باشارة المجموع مساهمة كل  
الحدود المدلية يهدين الدليلين في المجموع المذكور .

لقد حققنا وبغاية البساطة النقلة من حساب الانتروبي لحالة مصدر  
يولد الرموز بشكل مستقل الى حالة مصدر يولد الرموز معتمدا في توليده  
لكل رمز على ما سبق من الرموز ، كما استعرضنا بدائل ثلاثة لحساب  
او تعريف الانتروبي الخاصة بمصدر مرسل ، حيث تتكافىء هذه البدائل  
وهي ذات صحة مقبولة في حالة المصادر المستقرة . علينا ان نتذكر في  
هذا العرض ان مصادر النصوص اللغوية تعتبر وبشكل تقريبي مصادر  
مستقرة .

ليس تعريف الانتروبي لكل رمز بالشكل المتكامل السابق نهاية المطاف  
اذ تبرز مشكلة اهم وهي كيف نربط تلك الانتروبي بشكل واضح مع عدد  
الارقام الثنائية لكل رمز اللازمة لترميز الرسالة .

لقد رأينا ان تجزئة الرسالة في تراكيب من الاحرف او الكلمات ومعاملة  
كل تركيب كرمز يمكننا من حساب الانتروبي لكل تركيب باستخدام العلاقة  
الخاصة بحساب الانتروبي لكل رمز على حدة ، وان زيادة حجم التراكيب  
تقربنا اكثر واكثر من انتروبي المصدر .

تنحصر المشكلة اذن في اكتشاف طريقة الترميز الفعال باستخدام الارقام الثنائية لسلاسل الرموز المنتقاة من زمرة كبيرة جدا من الرموز ، حيث يحكم اختيار كل رمز احتمال معين . اوضح شانون وفانو كيفية اجراء مثل هذا الترميز المطلوب ، بينما هو فمان طريقة احسن سنستعرضها فيما يلي .

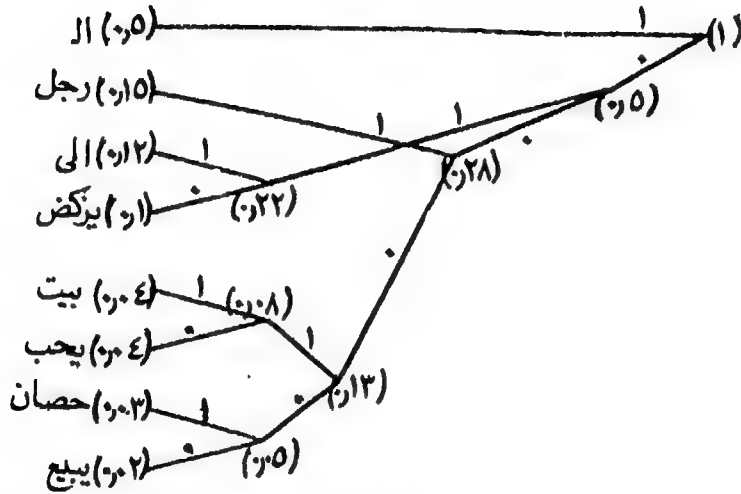
سندرج بهدف الايضاح كل الرموز الممكنة وفق احتمالاتها المتناقضة نفرض ان هذه الرموز هي الكلمات التالية : ال ، رجل ، الى ، يركض ، بيت ، يحب ، حصان ، يبيع والتي ترد بشكل مستقل وفق احتمالات محددة لدى اختيارها . يوضح الجدول التالي هذه الرموز مع احتمالاتها :

الكلمة	الاحتمال
ال	٪٥٠
رجل	٪١٥
الى	٪١٢
يركض	٪١٠
بيت	٪٠٤
يحب	٪٠٤
حصان	٪٠٣
يبيع	٪٠٢

نحسب الانتروبي لكل كلمة باستخدام علاقاتنا السابقة فنجد انها ٢٢١ بيت لكل كلمة . اذا ربطنا بكل كلمة احد الاعداد الثنائية الثمانية المكون كل منها من ثلاثة ارقام ثنائية ، لاحتجنا بالتالي لثلاثة ارقام بهدف بث كل كلمة . كيف يمكن ان ترمز الكلمات بشكل اكثر فعالية .

يوضح الشكل ٥ - ٣ اكثر الطرق فعالية لترميز الرسالة كلمة بكلمة ندرج الكلمات على يسار الشكل ونضع الاحتمالات بين اقواس . نختار اولاً الاحتمالين الادنى كمرحلة اولى لانشاء الترميز المطلوب : يبيع ٪٢ ، حصان ٠.٣ ر. ، ثم نرسم خطين باتجاه النقطة ٠.٥ ر. وهي احتمال يبيع

او حصان . نضع جانبا بعد ذلك الاحتمالات المفردة التي تم ربطها بخطوط ونحدد الاحتمالين الادنى اللذين لم يرتبطا بعد بخطوط وهما هنا : ٠.٤ و ٠.٤ « يحب » و ٠.٤ « بيت » . نرسم خطين الى نقطة ٠.٨ وهي مجموع ٠.٤ و ٠.٤ . نستعرض الان الاحتمالات المتبقية مع الاحتمالين الجديدين المتولدين ٠.٥ و ٠.٨ ، فيكون ادنى احتمالين هما ٠.٥ و ٠.٨ . لذا نصلهما بخطين الى النقطة ٠.١٣ . نتابع بهذا الشكل حتى تنتهي كل الخطوط الى نقطة مشتركة في اقصى اليمين وهي النقطة التي نشير اليها بالرقم ١ .



الشكل ٥ - ٣

نبدأ بعد ذلك من هذه النقطة الاخيرة ونتحرك نحو اليسار واضعنا الرقم ١ على كل خط متفرع من اي نقطة جهة الاعلى والرقم . على خط متفرع من نفس النقطة جهة الاسفل . نحصل اخيرا على الترميز المطلوب لكل كلمة وهو عبارة عن سلسلة الارقام التي نواجهها لدى انطلاقنا من النقطة ١ باتجاه الكلمة المعتبرة .

ندرج فيما يلي ترميز كل كلمة :

الكلمة	الاحتمال: ح	الرمز	عدد الارقام في الرمز ن	حاصل الضرب ن x ح
ال	%٥٠	١	١	%٥٠
رجل	%١٥	٠٠١	٣	%٤٥
الى	%١٢	٠١١	٣	%٣٦
يركض	%١٠	٠١٠	٣	%٣٠
بيت	%٠٤	٠٠٠١١	٥	%٣٠
يحب	%٠٤	٠٠٠١٠	٥	%٣٠
حصان	%٠٣	٠٠٠٠١	٥	%١٥
يسع	%٠٢	٠٠٠٠٠	٥	%١٠
				٢٢٦

يعطى حاصل ضرب احتمال ورود الكلمة في عدد الارقام المتضمنة في رمزها العدد الوسطي للارقام في كل كلمة محتواة في رسالة طويلة والناجم من ورد تلك الكلمة . يساوي مجموع . حواصل الضرب المذكورة ٢٢٦ ، وهذا هو اكبر بقليل من الانتروبي المحسوبة لكل كلمة والتي وجدناها ٢٢١ بيت لكل كلمة ، الا ان هذا المجموع اقل من عدد الارقام التي يمكن ان نستخدمها لتمثيل كل كلمة والمتساوي لـ ٣ ارقام .

لا تقتصر ميزات طريقة هوفمان على انها الطريقة الاكثر كفاءة لترميز مجموعة من الرموز لها احتمالات مختلفة ، بل يمكننا ان نبرهن ان ما تستلزمه من ارقام يزيد بقليل عن قيمة الانتروبي (كانت الزيادة في مثالنا ٥.٥ من الرقم الثنائي لكل رمز ) ، وان هذه الزيادة لا قيمة لها البتة .

نفرض اننا نقوم بدمج الرموز قبل ترميزها في تراكيب مكونة من رمز ، اثنين ، ثلاثة ، او اكثر . سيرتبط بكل من هذه التراكيب احتمال معين ( يساوي في حالة الخيار المستقل للرموز حاصل ضرب الرموز المنتقاة لانشاء سلسلة معينة ) . يمكننا استخدام طريقة هوفمان لترميز هذه

التراكيب . عندما نزيد حجم التراكيب ، يزيد بالمقابل عدد الارقام الثنائية المثلة لكل تركيب . الا ان طريقة هوفمان تستدعي من الارقام الثنائية لكل تركيب ما يزيد قليلا عن الانتروبي . وهكذا ان الازدىاد المطرد لعدد الارقام الثنائية المستخدمة لترميز تركيب معين والنتائج عن ازدىاد عدد الرموز في كل تركيب ، سيؤدي عندما يبلغ طول الرمز حدا كبيرا جدا الى اهمال الجزء البسيط للغاية الذي يعرف عدد الرموز في طريقة هوفمان عن الانتروبي ، وستساوى في النهاية الانتروبي مع عدد هوفمان .

نتصور قناة اتصال يمكنها بث عدد من نبضات القطع والفصل مساوي لـ ص في كل ثانية يمكن لهذه القناة امرار ص رقم ثنائي . اذا كانت ت هي انتروبي مصدر الرسائل مقاسة بالبيت في كل ثانية ، وكانت ت اقل من ص ، فان استخدام طريقة هوفمان سيمكن من ارسال الاشارات المرمزة عبر هذه القناة .

لا تمرر كل الاقنية الارقام الثنائية ، فبعض الاقنية مثلا تسمح بثلاثة نبضات من شدة مختلفة ، او نبضات مختلفة باطوال مختلفة كشيفرة مورس مثلا . نستطيع بذلك تصور قناة واحدة وقد وصلت الى عدة مصادر للرسائل لكل منها انتروبي خاصة وسرعة اصدار للمعلومات ونختار منها المصدر ذي الانتروبي الاعظمية ونسمي هذه الانتروبي سعة القناة ونرمز لها بالرمز ص ، تقاس طبعا بالبيت في الثانية .

يفضي استخدام طريقة هوفمان الى ترميز خرج القناة عندما تبث رسالة ذات انتروبي اعظمية باستخدام اقل عدد ممكن من الارقام الثنائية فيها الثانية ، وعندما تعتبر رسائل ممتدة مرمزة في سلاسل ممتدة من الارقام الثنائية ، يلزم عدد من الارقام الثنائية قريب جدا ، لـ ص لتمثيل الاشارات العابرة للقناة .

يمكن استخدام أسلوب الترميز هذا باتجاه معاكس ، اذ قد نلجأ لترميز عدد من الارقام الثنائية مساوي لـ ص في كل ثانية وارسالها عبر القناة وهكذا نستطيع ترميز مصدر ذي انتروبي بت باستخدام رقم ثنائي في الثانية ، ومرار ص بيت في كل ثانية عبر قناة منعزلة سمعتها ص .

لقد اصبحنا الآن في وضع يمكننا من تقديم واحدة من اهم النظريات المرتبطة بنظرية المعلومات . دعاهـا شانـون بالنظرية الاساسية للاقية .  
الخالية من الضجيج ، وصاغها على النحو التالي :

نفرض مصدرا ذي انتروبي ت بيت لكل رمز وقناة سمعتها في الارسال ص بيت في الثانية . يمكن في اطار هذا الافتراض ترميز خرج المصدر بحيث يـيـث بسرعة وسطية مقدارها  $(\frac{ص}{ت} - هـ)$  رمز في الثانية عبر القناة حيث هـ كمية صغيرة للغاية ، ولا يمكن ان يـيـث بسرعة وسطية تتجاوز القيمة  $\frac{ص}{ت}$  .

نعيد عرض هذه النظرية بعيدا عن تقنياتها الرياضية . لكل قناة منعزلة معتبرة لها سعة ص خاصة بها ، سواء انقلـت تلك القناة الارقام الثنائية ، الاحرف والاعداد ، او النقاط ، الفواصل والخطوط من طول معين ، كما ان لكل مستقر انتروبي معينة ت . اذا كانت ت اقل او تساوي ص فاننا نستطيع بث الرسائل التي يولدها المصدر عبر القناة . اما اذا كانت ت اكبر من ص ، فعليـنا الا نبث الرسائل المولدة من المصدر عبر القناة ، لان جهودنا لتحقيق ذلك ، ببساطة ، لن تفلح .

اوضحنا فيما تقدم كيفية برهان القسم الاول من هذه النظرية ، بينما لم نطرق الى استحالة ترميز مصدر ذي انتروبي ت بعدد من الارقام الثنائية لكل رمز اقل من ت ، الا ان ذلك يمكن برهانه ببساطة .

نشعر في هذه المرحلة اننا احطنا وبثقة بحقيقة هامة مفادها ان انتروبي المصدر المرسل مقاسة بالبيت تطلعنا على عدد الارقام الثنائية



اللازمة لكل حرف او كلمة او في كل ثانية من اجل بث الرسائل التي يولد المصدر . ( تقابل هذه الارقام الثنائية نبضات الفصل والوصل ، واصطلاحات نعم ولا ) يرجع هذا التمييز الى بحث شانون الاساسي . واقع الامر ان مصطلح بيت وهو في اللغة الانكليزية Bit منحوت باختصار من كلمتين Binary اي ثنائي و digit اي رقم .

تختلف الانتروبي ، على كل حال ، مقدرة بالبيت عن عدد الارقام الثنائية على الصعيد العملي . نعرض على سبيل المثال مصدر رسائل يولد بشكل عشوائي الرمز ١ وفق احتمال مساو ل  $\frac{1}{2}$  والرمز ٠ باحتمال مقابل يساوي  $\frac{1}{2}$  ، وان ذلك المصدر يولد الرموز المشار اليها بسرعة ١٠ رموز في كل ثانية . صحيح ان هذا المصدر يعطي الارقام الثنائية بمقدار ١٠ ارقام في كل ثانية ، الا ان السرعة المعلوماتية له والانتروبي تساوي فقط ٨.١١ بيت لكل رقم ثنائي وهي تساوي ٨.١١ بيت في كل ثانية . نستطيع ترميز سلسلة الارقام الثنائية المنتجة من قبل هذا المصدر باستخدام عدد وسطي من الارقام الثنائية مساوي ل ٨.١١ في كل ثانية .

نفترض ، شكل مماثل قناة اتصال قادرة على نقل ١٠٠٠٠٠ نبضة قطع ووصل في كل ثانية . ان سعة هذه القناة هي ١٠٠٠٠ بيت في كل ثانية حسب ما تقدم ، الا ان استخدامها لنقل نموذج متكرر من النبضات سيعني بالتالي عدم نقلها اي معلومات ، بشكل ادق تكون سرعة نقلها للمعلومات في هذه الحالة مساوية لصفر بيت في الثانية على الرغم من سعتها التي اشرنا اليها .

انطوى ادراجنا لمفهوم البيت هنا على المقايسة الثنائية لكمية المعلومات ، كقياس الانتروبي او سرعة المعلوماتية لمصدر رسائل وفق واحدة البيت لكل رمز او البيت في الثانية ، او كقياس لامكانيات قناة ما في مجال نقل المعلومات مقاسة بالبيت لكل رمز او البيت في الثانية . نستطيع وصف البيت على انها خيار اولي ثنائي او قرار يبين امكائيتين متساويتي الاحتمال . تمثل البيت عند مصدر الرسائل كم محدد من

الخيار فيما يتعلق بالرسالة التي سيتم اصدارها . وكمثال على ذلك نذكر ان كتابة النصوص اللغوية تضعنا امام خيار وسطي قدره ١ بيت لكل حرف . تتكشف واحدة البيت عند المستقبل عن درجة من الريبة ، ففي استعراض النصوص اللغوية هناك تقريبا ١ بيت من الريبة فيما سيكون عليه الحرف التالي .

عندما نبث رسائل منتجة من مصدر معين بواسطة نبضات القطع والواصل ، فاننا نعلم بدرجة كافية كمية الارقام الثنائية المنطلقة في كل ثانية حتى عندما لا نعلم أي شيء عن الانتروبي المصدر ، وينطبق هذا في معظم الحالات . اذا عرفنا ان انتروبي المصدر اقل من الارقام الثنائية التي يتم توظيفها في كل ثانية ، لعلنا اذ ذاك بشكل مسبق امكان قيامنا بالعمل باستخدام عدد اقل من الارقام الثنائية في كل ثانية . لقد تعلمنا كيفية استخدام الارقام الثنائية لتقرير خيار واحد من عدة امكانات مختلفة ، اما باستخدام شجرة كتلك التي وضحها الشكل ٤ - ٤ ، او بواسطة طريقة هوفمان التي عرضها الشكل ٥ - ٣ . انه امر شائع في مثل هذه الحالات ان نتحدث عن سرعة البث مقدرة بالبيت في الثانية ، الا ان ذلك قد يشوش من ليس لديهم خبرة كافية ويعثر خطاهم .

كل ما اطلبه من القارئ العزيز ان يتذكر انني استخدمت البيت في معرض واحد فقط هو قياس المعلومات ، وانني بصوت ال . او ال ١ رقم ثنائي . اذا ارسلنا ١٠٠٠ رقم ثنائي اختيرت بشكل حر في كل ثانية نستطيع اذا ذاك تنفيذ بث معلوماتي بمعدل ١٠٠٠ بيت في كل ثانية . اذا وجدنا من المناسب استخدام البيت في معرض تناولنا للرقم الثنائي فعلىنا في هذه الحالة ان نكون متفهمين وبدقة لما نحن قاعلون .

نتوقف الآن للحظة بقصد العودة الى طريقة هوفمان التي عرضناها للتو . عندما نستخدم هذه الطريقة لترميز رسالة ما ونحصل على سلسلة غير متقطعة من الرموز كيف لنا ان نقرر فيما اذا كان علينا استخدام رمز معين مثل ١ وارد في سلسلة الرموز كممثل لكلمة ال او كممثل لكلمة اخرى .

إذا عدنا الى مثالنا في حالة طريقة هوفمان نلاحظ ان اي من الرموز الواردة لا يشكل الجزء الاول من رمز آخر . تسمى هذه الظاهرة بخاصة البدء ولها نتائج هامة ومدهشة سهلة الايضاح . نفرض مثلاً اننا نرمز الرسالة . الرجل يبيع البيت الى الرجل الحصان يركض الى الرجل . تكون الرسالة المرمزة على الشكل التالي :

ال	رجل	يبيع	ال	بيت
١	٠ ٠ ١	٠ ٠ ٠ ٠ ٠	١	٠ ٠ ٠ ١ ١
			ال	رجل
الى	ال	رجل	ال	حصان
١ ١	١	٠ ٠ ١	١	٠ ٠ ٠ ٠ ١
الى	ال	رجل	ال	حصان
يركض	الى	ال	رجل	
٠ ١ ٠	٠ ١ ١	١	٠ ٠ ١	
يركض	الى	ال	رجل	

كتبنا هنا كلمات الرسالة فوق الرموز . أما الكلمات تحت الرموز فقصدنا بها إمكانية تحليل خاطيء لمحتوى الرسالة لدى المستقبل ، إذ قد يحدث اننا لن نطلق الرسالة إلاّ بدءاً من رمز البيت ٠ ٠ ٠ ١ ١ ، وأن الصفر الأخير منه لم يرسل لسبب ما ، لذا نحلل الكلمة الاولى وفق رموزنا على انها ( الرجل ) ، إلاّ اننا نلاحظ بعد ذلك أن الرسالة سرعان

ما تستعيد صحتها . ليس من الضروري أن نعرف المقطع حيث بدأت الرسالة حتى يتسنى لنا تحليلها بشكل صحيح ، إلا إذا كانت الرموز من نفس الطول .

إذا نظرنا إلى الوراء قليلاً نجد أننا حققنا أهداف هذا الفصل . فقد توصلنا إلى قياس المعلومات التي يولدها مصدر مستقر وهو قياس منسوب لكل رمز أو لكل ثانية من الزمن، وأوضحنا كيف أن هذا القياس يكافئ القيمة الوسطية لعدد الأرقام الثنائية اللازمة لبث الرسائل التي تنبثق عن المصدر المذكور ، كما رأينا أن تحقيق الإرسال باستخدام ما يزيد عن الانتروبي جزء طفيف من البيت ، يوجب أن نرسم الرسائل التي يولدها المصدر في تراكيب طويلة ، ولا تقتصر على اعتبارها سلسلة من الرموز التفصيلية .

رب سائل يقول : ما هو الطول المفروض والممكن للتراكيب ، نعود هنا إلى اعتبار آخر . هناك سببان رئيسيان للترميز ، وفق التراكيب الطويلة . أما السبب الأول فهو أن نجعل القيمة الوسطية المستخدمة في طريقة هوفمان لعد الأرقام الثنائية المقابلة لكل رمز أكبر بقليل من الانتروبي محسوبة لكل رمز ، في حين يتعلق السبب الثاني بتأثير الرموز السابقة على احتمال ظهور رمز معين سيما عندما نواجه موضوع الترميز الفعال للنصوص اللغوية . رأينا أن ذلك ممكن من حيث المبدأ باستعمال التراكيب الطويلة والعلاقة الخاصة بحساب الانتروبي لكل رمز .

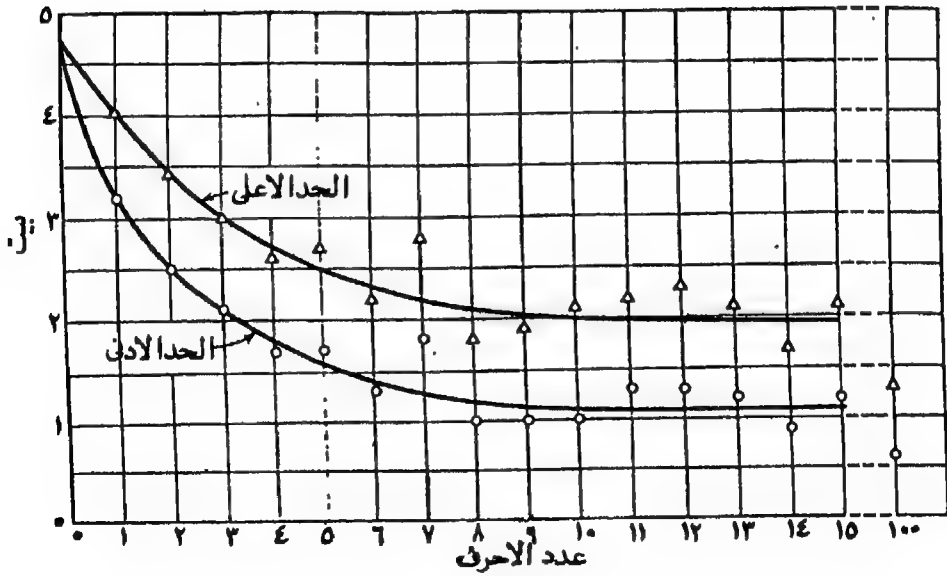
نطرح ، إذن ، السؤال مرة أخرى ، ولكن في صيغة جديدة :

كم عدد الرموز التي يجب أن يحتويها كل تركيب بحيث يتحقق الشرطان :

١ - ترميز هوفمان له كفاءة عالية . ٢ - إذا اعتبرنا الانتروبي لكل تركيب باهمال علاقات التركيب مع ما يقع خارجه ، فإن هذه الانتروبي يجب أن تكون قريبة جداً من حاصل ضرب العدد في الانتروبي لكل رمز . إذا كنا يصدد النصوص اللغوية ، فإن الشرط الثاني هو الأكثر أهمية .

حسب شانون الانتروبي لكل حرف في حالة النصوص الانكليزية بقياس قابلية شخص ما لتخمين الحرف التالي من النص بعد رجوعه الى الحرف الاول والثاني والثالث . . . الخ مما سبق من الأحرف . استندت تلك النصوص بالطبع الى الابجدية الانكليزية المؤلفة من ٢٦ حرف مع فراغ اضافي .

يوضح الشكل ٥ - ٤ الحدين الأدنى والأعلى الانتروبي للنصوص الانكليزية بدلالة الأحرف التي اطلع عليها الشخص المعني قبل إصدار جزوه المنتظر .



الشكل ٥ - ٤

ينخفض المنحني بشكل ملحوظ بين العددين ١.٥ - ١٠٠. اللذين  
يشيران لعدد الأحرف ، بينما يهبط ببطء بين العددين ١٠ - ١٥٠ ، يؤكد  
ذلك أن الترميز الفعال لنصوص اللغة الانكليزية يقضي استخدام تراكيب  
لا تقل أطوالها عن ١٠٠٠ حرف .

نعطينا قراءة الشكل ٥ - ٤ قيمتين هما ٠.٦ ، ١.٣ بيت لكل حرف ،  
تنحصر بينهما انثروبي النصوص الانكليزية . دعونا نفرض القيمة ١ لتلك  
الانثروبي ، فنحتاج اذ ذاك الى ١٠٠٠ عدد ثنائي لترميز تراكيب مؤلف  
من ١٠٠ حرف . يعني هذا أن هناك  $2^{1000}$  سلسلة ممكنة من التراكيب  
الانكليزية . يحتوي كل منها على ١٠٠ حرف . والاعطاء فكرة عن حجم  
العدد  $2^{1000}$  نقول أنه يساوي تقريبا واحد متبوع بـ ٣٠٠ صفر ، يا له من  
عدد هائل .

يقودنا البحث من احتمال ورود كل التراكيب ذات المعنى المؤلف كل  
منها من ١٠٠ حرف من الأبجدية الانكليزية ، الى حساب التواترات  
النسبية لكل تراكيب ، إلا أننا سرعان ما سندرك استحالة هذه العملية  
عندما نعلم أن هناك تقريبا من هذه التراكيب  $2^{300}$  ١٠٠ تراكيب مختلف .

إلا أن ذلك مستحيل أصلا من حيث المبدأ . فمعظم التراكيب  
المعدودة من أصل  $2^{300}$  تراكيب لم تكتب بعد ، علما أن العدد  $2^{300}$  لا يشمل  
فعلا كل التراكيب ذات المعنى . تؤكد بالتالي استحالة الحديث من  
التواترات النسبية والاحتمالات الخاصة بهذه التراكيب وفق ورودها  
في النصوص الانكليزية .

تواجهنا هنا معضلتان : ما هي دقة توصيف النصوص اللغوية  
باعتبارها ناتج مصدر مستقر ، وما هي الخصائص الاحصائية الأساسية  
للك مصدر . قد نميل الى الاعتقاد بوجود احتمالات مناسبة لدى  
الانسان حتى إذا لم يكن تقييمها ممكنا بتفحص النصوص المكتوبة . أو

لربما أن تلك الاحتمالات موجودة فعلاً وأن معرفتها ممكنة ليس من خلال الطريقة البدائية لحساب احتمالات ورود سلاسل الأحرف ، بل باتباع أسلوب آخر أكثر نجاعة . لقد استعرضنا علاقات مختلفة لحساب الانتروبي في حالة المصدر المستقر وحالة الآلة المتناهية الحالات ، كما عرجنا في نهاية الفصل الثالث على فكرة اعتبار الإنسان في حالة معينة وانتاجه تبعاً لذلك لرمز أو كلمة ، ورأينا أن مثل هذه الفكرة جديرة بالاهتمام فعلاً .

بمعارض بعض اللغويين بحجة أن القواعد اللغوية لا تتفق وخرج الآلة المتناهية الحالات . نعتزف في هذا الصدد أنه لفهم بنية النصوص اللغوية والانتروبي الخاصة بها أن نتمق أكثر في دراسة النصوص اللغوية مما فعلناه حتى الآن .

أن تطبق نظرية رياضية بشكل مباشر ميكانيكي على حقول الافتراضات المجردة التي انبثقت عنها تلك النظرية ، هو عمل على جانب كبير من الأمان وفي غاية المهارة . بينما علينا أن نلتزم أكثر بالحكمة والتعقل عند تطبيق نظرية رياضية على أمور واقعية ، مهما كانت تلك النظرية جيدة ومناسبة . إذا رغبنا فعلاً بربط النصوص اللغوية بنظرية الاتصالات وإنجاح هذا الربط أكثر ما يمكن ، فعلياً أن نسعى إلى أشكال بسيطة وواقعية للقوانين الحاكمة لتلك النصوص . تنطوي تلك القوانين بالطبع على قواعد اللغة ، وسنستعرض تلك القواعد في الفصل القادم .

وفي كل الأحوال ، فإننا نعلم معلومات إحصائية جيدة عن النصوص اللغوية ، كتواتر الكلمات والأحرف ، كما تؤهلنا نظريات الترميز للاستفادة من كل تلك المعلومات .

إذا رمزنا النصوص الانكليزية حرفاً بحرف ، غاضين النظر عن التواترات النسبية للأحرف يلزماً عندها ٢٧؛٦ رقم ثنائي لكل حرف ، ونعتبر الفراغ في هذه الحالة حرف ، بينما إذا كررنا نفس العملية

أخدين بعين الاعتبار التواترات النسبية للأحرف ، يصبح الراسم المذكور ٤٠٣ رقم ثنائي لكل حرف . اما إذا رمزناها كلمة بكلمة وفق التواترات النسبية للكلمات نحتاج لـ ١٠٦٦ رقم ثنائي لكل حرف ولقد استطاع شانون باستخدام طرق مبدعة تحديدًا لانتروبي للنصوص الانكليزية بين العددين ٠٦ - ١٣ بيت لكل حرف ، ونأمل بذلك ان نلتقي ترميزاً اكثر فعالية .

إلا ان اندفاعنا بشكل ميكانيكي في اتباع طريقة معينة حتى نهايتها لحساب الانتروبي ، قد يضعنا في مواجهة صعوبات كبيرة ويضيع جوهر بحثنا . وإذا حدث ذلك فيعود بشكل جزئي الى الفروق بين الانسان كمصدر للنصوص اللغوية وبين نموذج المصدر المستقر الذي درسناه ، واما السبب الجزئي الآخر فهو طريقة التناول غير الملائمة . إن نموذج الانسان كمصدر مستقر للنصوص هو نموذج جيد ومفيد إلا أنه ليس كاملاً بالطبع ، لذا نقيم عالياً هذا النموذج .

لقد كان هذا الفصل طويلاً وغنياً بالتفاصيل ، وبحاج قبل إنهائه الى عرض موجز . لن نستطيع بالطبع تلخيص كل ما قدمناه ، فقد احتاج ذلك التقديم الى صفحات كثيرة . لذا سنكتفي بالتركيز على النقاط الهامة وحسب .

تقدر الانتروبي الخاصة بكل اشارة في نظرية الاتصالات بالبيت لكل رمز او لكل ثانية وهي تعطي القيمة الوسطية لعدد الأرقام الثنائية لكل رمز او لكل ثانية ، الضرورية لترميز رسالة ينتجها مصدر ما .

نتصور مصدر الرسائل على انه يختار بشكل عشوائي ، أي بشكل غير قابل للتنبؤ ، رسالة من بين رسائل متعددة ممكنة . لذا نربط الانتروبي في حالة المصدر بمقدار الخيار الذي يمارسه المصدر في انتقاء رسالة معينة ستبث فعلاً .



أما عن المستقبل ، فنفرض أنه قبل استلامه للرسالة سيكون غير أكيد فيما يتعلق بالرسالة التي سيولدها المصدر ويرسلها إليه . بناء على ذلك، ننظر الى انتروبي مصدر الرسائل كمعيار لريبة المستقبل حول الرسالة التي ستصل ، وهي ريبة ستحل عند استلام الرسالة .

إذا تم اختيار الرسالة من بين عدد من الرسائل متساوية الاحتمال كان الانتروبي لع ن ، حيث ن هو عدد الرسائل الممكنة . ويبدو هذا التعريف طبيعياً للغاية ، لأنه إذا توفر لدينا عدد من الأرقام الثنائية يساوي لع ن ، لتمكنا من استخدامها في كتابة مجموعة من الأعداد الثنائية تضم :

$$\text{لع ن} = \frac{1}{2} \text{ عدد ثنائيا .}$$

وسنربط الرسالة المولدة بأحد هذه الأعداد . أما إذا لم تكن الرموز متكافئة الاحتمال ، وهي الحالة العامة ، فتعطى الانتروبي وفق أول علاقة عرضناها في هذا الفصل . إذا اعتبرنا تركيباً طويلاً من الرموز ، لا يعتمد محتواه الا قليلاً على ما سبقه من الرموز ، ونظرنا إليه كرمز جديد ، فيمكننا تعديل العلاقة المذكورة لنحصل على انتروبي المصدر لكل رمز ، حيث يعتمد اختيار رمز معين على الرموز التي سبق وجرى اختيارها . تفسح هذه الأفكار المجال لنا لاستنتاجات علاقات أخرى خاصة بالانتروبي كانت في عداد مواد هذا الفصل .

إذا استخدمنا طريقة هوفمان في الترميز ، وهي طريقة ذات كفاءة عالية ، نستطيع أن نبرهن أن انتروبي المصدر المستقر مقاسة بالبيت تساوي القيمة الوسطية لعدد الأرقام الثنائية اللازمة للترميز .

قد لا تمرر قناة اتصال نموذجية الأرقام الثنائية ، ويمكن أن تحمل الأحرف أو الرموز الأخرى . نتصور أننا وصلنا عدة مصادر الى مثل هذه القناة ، وبحسنا بعد ذلك بوسائل رياضية عن المصدر الذي سيجعل

من انتروبي الرسالة العابرة للقناة أكبر ما يمكن . نستطيع تعريف سعة قناة الاتصال النموذجية استناداً لما تقدم ، ونعني بالقناة النموذجية القناة الخالية من الأخطاء ، تعطى سعة هذه القناة بأكبر انتروبي لرسالة يمكن أن تمررها القناة . يمكن البرهنة على أنه إذا كانت انتروبي المصدر أقل من سعة القناة فإن القناة في هذه الحالة تمرر رسائل المصدر المرمزة . تعرف هذه بنظرية شانون الأساسية للأقنية الخالية من الضجيج .

تمكننا العلاقات الواردة في هذا الفصل من حساب انتروبي المصدر بواسطة التحليل الاحصائي للرسائل المنبثقة عنه ، إلا أن ذلك قد يستدعي حسابات طويلة حتى في حالة المصادر المستقرة . أما في حالة المصادر الفعلية كالنصوص اللغوية ، فإن الوصفات الأولية لحساب الانتروبي تبدو لا معنى لها .

يتحقق الحساب التقريبي لقيمة الانتروبي بإهمال أثر الرموز السابقة على احتمال اختيار المصدر للرمز التالي ، وتكون القيمة التقريبية الناتجة عادة أكبر وتستلهم الترميز باستخدام عدد من الأرقام الثنائية أكثر مما يلزم . وهكذا إذا رمزنا النصوص الانكليزية حرفاً بحرف بصرف النظر عن الاحتمالات النسبية للأحرف ، نحتاج إلى ٤.٧٦ رقم ثنائي لكل حرف ، أما إذا رمزناها كلمة بكلمة ، آخذين بعين الاعتبار الاحتمالات النسبية للكلمات لاحتجنا إلى ١.٦٦ رقم ثنائي لكل حرف .

وإذا رغبتنا برفع مستوى أدائنا لاعتبرنا الميزات الأخرى للغة كنماذج القواعد اللغوية مثلاً على احتمال توليد المصدر لكلمة معينة .

على الرغم من أننا لا ندرى طريقة معينة يمكن بواسطتها ترميز النصوص الانكليزية بأكثر ما يمكن من كفاءة ، فقد أجرى شانون تجربة مبدعة أثبت بموجبها أن انتروبي النصوص الانكليزية تتراوح بين ٠.٦ إلى ١.٣ بيت لكل حرف . انطوت هذه التجربة على تحزير شخص معين عن الحرف التالي في نص مكون من عدد كبير من الأحرف .

## الفصل السادس

### اللغة والمعنى

يتلخص الانجازان الكبيران لنظرية المعلومات بتعريف وحساب استطاعة القناة وعلى الأخص تحديد عدد الأرقام الثنائية اللازمة لإرسال المعلومات من مصدر معين ، وكذلك أن سرعة المعلومات عبر قناة مشوبة بالضجيج يمكن أن تأخذ كل القيم المتزايدة طالما أن الإرسال يحدث دون أخطاء رغم وجود الضجيج ، تقدر هذه السرعة بالطبع بالبيت لكل حرف أو البيت لكل ثانية يجب أن تثبت كل النتائج وفي كل الأحوال للمصادر والأقنية المتقطعة وكذلك المستمرة .

لقد استغلنا مرحلة أعداد طويلة في الفصول الأربعة الأولى أصبح بمقدورنا بعدها وفي الفصل الخامس طرح مشكلة عدد الأرقام الثنائية اللازمة لإرسال المعلومات المولدة عن مصدر مستقر فعلي . لو كان هذا الكتاب مجرد كتاب مدرسي عن نظرية المعلومات ، لانتقلنا إذن إلى المرحلة المنطقية التالية ، وهي القناة المشوبة بالضجيج ومن ثم القناة المستمرة والمستقرة .

إلا أن أفكارنا سرعان ما ستعود عند نهاية هذه العملية المنطقية المتقدمة إلى اعتبار مصادر الرسائل في العالم الواقعي ، والتي يمكن وصفها بتقريب ما على أنها مستقرة ومن ثم حساب الانتروبي الخاصة بها . والبحث من أكثر الطرق كفاءة في ترميز الرسائل الصادرة عنها .

ونحن بدورنا سنتوقف هنا عن الاسترسال في الشروح الرياضية  
لنظرية الاتصالات ونتناول أكثر أدوات الاتصال تشويقاً وجاذبية ، نغني  
اللغة ، ولكن من منظور نظرية الاتصالات . اذ يحق لنا وقد علونا قمة  
من قمم المعرفة المتواضعة ان ننظر منها الى جانب هام من حياتنا ، وأن  
نتبين فيما اذا كانت مشاكل اللغة والمعنى ستبدو مختلفة في اطار  
ما تعلمناه .

نطلب من القارئ العزيز ان يكون حذراً في هذا السياق . لقد كان  
تركيزنا حتى الآن على ما نعرفه ، وما نعرفه هو النواة الصلبة للعلم .  
يجد العلماء صعوبة بالغة في مشاركة الانسان العادي بما يعرفونه . اعتقد  
بناء على ذلك ان الاحاطة بالمعارف العلمية تقتضي جهوداً جبارة كتلك التي  
بذلها القارئ عبر الفصول القليلة السابقة .

على ان هناك جانباً أبسط وأكثر امتاعاً للعلم . انه ذاك الضرب من  
الجهل المعلن . يختلف جهل العالم عن جهل الانسان العادي ، ذلك لان  
الخلفية العلمية لدى العالم والمكونة من النظريات والحقائق المثبتة تبعد  
عن ميدان تنبؤاته كل الافتراضات والتصورات التي لا معنى لها . اما  
الشكل الأعلى والحدي من جهل العالم وهو الذي نطلق عليه اسم الجهل  
المعلن فيشمل أصل الكون والاصول العميقة للمعرفة وعلاقة مستوى  
المعارف الحالية بالارادة الحرة والاخلاقيات والسياسة . سنحوم في هذا  
الفصل الخاص حول موضوع اللغة بشكل يمكن ان نطلق عليه من وجهة  
النظر العلمية انه الجهل المعلن بموضوع اللغة .

نعود فنؤكد ان ما سنعرضه في هذا الفصل ليس أكثر من بنود نابعة  
من الجهل المعلن ، وهذا التأكيد ضروري للغاية اذ قلما يجد الانسان غير  
المتخصص وسيلة ناجعة يستطيع بواسطتها التفريق بين الحقيقة العلمية  
والجهل العلمي . ان الجهل اسهل تمثلاً من العلم ذلك لان الجهل يمكن  
التعبير عنه بعبارات عريضة شديدة العمومية وجمل ذات كفاءة منخفضة  
بالمقارنة مع الحقيقة ، ولان الجهل اضافة الى ذلك معنى بالمشاكل غير  
المحلولة فهو أكثر رومانسية . ينتشر الجهل أكثر ويجد له صدى أوسع  
بالمقارنة مع الحقائق العلمية .

واذا كان الجهل خطراً بهذا الشكل على الانسان العادي ، فله موقع مهم لدى العالم ، فمنه يكون العالم الرؤى المحيطة بالعوالم البعيدة والأبعاد غير المنظورة ، وهذا ينزع الاحساس الآني بالراحة والرضى الذاتي لديه ويستحثه لإسراع خطاه على طريق الاكتشاف بدلا من مجرد السير البطيء على ذلك الطريق . عندما يحس العالم بجهله ، فسرعان ما سيخطط لما يتوجب عليه ان يفعله ، في حين ان الانسان العادي لن يستطيع ذلك وسيثنيه في اجواء الجهل الضبابية دون ان يجد اي فرصة لوضع قدمه على ارض المعرفة الامينة .

نعود الآن الى حيث واجهنا مشكلة اللغة لننتقل من هناك ، بعد ان وضعنا الخطوط العامة لمحاذاير تقدمنا في ارض مجهولة .

سنقتصر فيما يلي من بحثنا على قواعد اللغة الانكليزية . نعرف جميعاً ان اللغة اليومية الدارجة لا تخضع لقواعد اللغة ، مثلما مؤلفات غير تروود شتاين . ويظهر الخروج عن قواعد اللغة خاصة في المحاضرات العلمية والتكنيكية . يذهب المغالون في الالتزام بقواعد اللغة حد رفض كثير من الاشعار الجيدة ، بحجة عدم موافقتها لتلك القواعد .

لذا فإن استعراض قواعد اللغة لا يعني تغطية كل الجمل المنظومة او المكتوبة وجل ما يفعله هو انه يرسي مساراً إجمالياً يمكن أن نتبعه باهتمام وبشكل منظم .

عرفنا فيما سبق ان كتابة اي نص لغوي يجب ان يخضع الى عدد من القيود . يمكن ان نجد تفاصيل كل تلك القيود في كتاب متكامل عن قواعد اللغة . تفند تلك القواعد الاحكام اللازمة لإنشاء اي سلسلة من الكلمات التي سيتم قبولها في وقت معين ووفق معيار معين على انها منسجمة مع القواعد .

ان قضية قبول الإنشاء اللغوي من وجهة نظر القواعد هي قضية شائكة وغير واضحة المعالم ، فكثيراً ما تقبل مخالافات للقواعد وفق المؤلف

ووفق منزلة الكتاب وغالباً ما تكون نفس المخالفات غير مقبولة إذا استخدمت في مجالات أخرى . وبصورة عامة يتغير ما هو مقبول بالنسبة للقواعد بشكل مستمر . قصدنا بذلك مجرد الملاحظة وننتقل الآن الى مواضيع أخرى .

تتضمن القواعد مجموعة من الاحكام المسبقة التي تسمح بالإنشاء اللغوي الاصولي ، اي الإنشاء الخاضع لتلك الاحكام وحسب . والى جانب ذلك فهذه الاحكام مهمة أخرى ، اذ بواسطتها نتمكن من تمييز كل الجمل والمقاطع المتفقة مع تلك الاحكام والواردة في نص معين ، من الجمل والمقاطع الأخرى غير المتفقة معها .

اذا استطعنا الاحاطة بتلك الاحكام كان بإمكاننا اجراء تقييم جديد لانتروبي النصوص الانكليزية ، اذ نميز في هذه الحالة الاجزاء التي هي عبارة عن تطبيق ميكانيكي ومباشر للقواعد والاجزاء الأخرى التي تنطوي على خيار او رية وتساهم بذلك في الانتروبي . ونستطيع ، أكثر من ذلك ، بث الرسائل اللغوية بشكل فعال بأن نحمل الرسالة المعلومات المتعلقة بالخيارات الممارسة أثناء الإنشاء ، ونستخدم عند المستقبل آلة قواعد خاصة تعيد انشاء الجمل وفق اصول القواعد استناداً للخيارات المدرجة في الرسالة المستقبلية .

ليست احكام القواعد هي كل شيء في اللغة ، فقد تبدو جملة ما في منتهى الغرابة رغم خضوعها الكامل لاحكام القواعد . يمكن لالة انشاء لغوية لقيمت كل القواعد بكل تفاصيلها ، ان تتركب جملة مثل : اكل الخبز الخبز . اذ ان كل ما تفعله الآلة هو جملة من الخيارات بين الكلمات آخذة بعين الاعتبار القواعد اللغوية ، اما الانسان فيبني خياراته بشكل مخالف ، اذ ان الكاتب يتبع احكام القواعد ، الا انه يجري خيارات أخرى أيضاً . ان فهم القواعد لن يكشف لنا كل اسرار اللغة ، الا انه سيدفعنا خطوة الى الامام على الطريق الصحيح .

ما هو نوع الاحكام التي ستمخض عن جمل سليمة من وجهة نظر القواعد ، وعن كل الجمل بشكل عام ، حتى لو كانت الخيارات عشوائية . رأينا في الفصل الثاني كيفية انتاج نصوص شبيهة بالنصوص الانكليزية وذلك باختيار كلمة عشوائياً وفق احتمال ورودها بعد سلسلة معينة ومحددة الطول من الكلمات ، وكان مثالنا حين ذاك التقريب الثاني الذي ترد وفقه الكلمة على اساس الكلمة السابقة لها .

يمكن لأي منا انشاء تقريبات اعلى باستخدام المعارف اللغوية المخترنة في دماغه ، وهكذا يستطيع مثلاً تحقيق التقريب الرابع باعتباره ثلاثة كلمات متتالية وعرضها على شخص آخر لاضافة كلمة رابعة والحصول على جملة ، وبتكرار هذه العملية والانتقال من شخص لشخص قد نحصل على مقطع مثل : حدث ذلك في منظر ضبابي للأشجار المترنحة بهدوء على الجسر .

يعد هذا المقطع معقولاً بكيفية ما لأن اختيار الكلمات لم يتم بشكل عشوائي وانما أجرته كائنات عاقلة . والشيء المدهش في مثل هذا المقطع ملائمته لاحكام القواعد ومنطقيته المقبولة على الرغم من أنه انشئ بشكل مطرد بإعطاء الكلمات الثلاثة الأخيرة من الجزء المتكامل منه عند مرحلة معينة والطلب الى شخص ما اضافة الكلمة الرابعة . وعلى الرغم من ذلك فقد نحصل أحياناً على مقاطع غير معتدلة البنية اذا اتبعنا نفس الطريقة ، مثلاً قد نحصل على المقطع : رأيت آخر مرة عندما عاش ، الذي يبدو ايضاً غير موافق لاحكام القواعد بشكل كامل .

إذا كان شانون على حق وإذا توفر في النصوص الإنكليزية خيار يكافئ ١ بيت لكل رمز ، فإن الاختيار من بين ٤ كلمات يعني حوالي ٢٢ خيار ثنائي ٢ او خيار بين ١٠ ملايين تركيب في كل تركيب ٤ كلمات . يمكن من حيث المبدأ ان يقوم كومبيوتر بإضافة الكلمات استناداً لمثل هذا الجدول من التراكيب ، إلا أن النواتج لن تكون ملائمة لاحكام القواعد بشكل مؤكد ، أضف الى ان هذه الطريقة الطويلة جداً قد لا تتمخض عن كل

السلاسل الممكنة من الكلمات الخاضعة لأحكام القواعد ، فهناك بعض سلاسل الكلمات التي قد تشكل جزءاً من جملة سليمة وفق القواعد في بعض الأحوال ولا يمكنها تحقيق ذلك في أحوال أخرى . وهكذا إذا لم نضمها فستأتي النتيجة ناقصة بعض الجمل السليمة وفق القواعد .

أما إذا اعتبرنا التراكيب المحتوية على أكثر من ٤ كلمات ٢ فسنفضل عندها القواعد على الكمال ، ويحدث العكس إذا خففنا عدد الكلمات في كل تركيب عن ٤ ، إذ عندها ستكون المفاضلة للقواعد على حساب الكمال .  
إننا لن نستطيع جمع الاثنين .

تعاود الظهور ، في هذه المرحلة ، فكرة الآلة المتناهية الحالات . فلربما إننا نستطيع ربط آلة منتجة للجمل اللغوية ، تكون في حالة معينة عند كل نقطة من الجمل وهذا سيسمح لها بإجراء خيارات معينة وفق الحالات التي يمكن أن تنتقل إليها انطلاقاً من الحالة المحددة ، ولربما أن مثل هذه الآلة سيتمكنها التعامل مع أنواع معينة من الكلمات كالاسماء المفردة ، والصفات والأفعال وغيرها وبذات تستطيع إنتاج نصوص لغوية سليمة وفق القواعد وتفسح المجال لتضمين الكلمات فيها بأكثر من ملائمتها لاندراج سلاسل الكلمات .

يبدو تشبيه القواعد بآلة متناهية الحالات مشجعاً بصورة خاصة ذلك لأن بعض وجهات النظر للإنسان ترى فيه آلة متناهية الحالات ، ببساطة لأنه يتكون من عدد محدد من الخلايا وبالتالي من عدد محدد من الدورات .

يرفض شومسكي ، وهو لغوي معاصر معتبر ، فكرة الآلة المتناهية الحالات كنموذج ممكن أو ملائم للقواعد اللغوية ، فهو يشير إلى عدد من أحكام انشاء سلاسل الرموز التي تضمينها في مثل هذا النموذج . من هذه الأحكام مثلاً أن نختار على التتالي الأحراف الأبجدية بشكل عشوائي حتى ظهور الحرف Z ثم نكرر بعد ذلك كل الأحراف المدرجة اعتباراً من آخر ورود للحرف Z ولكن بترتيب معاكس ، نتابع بعدها في



مجموعة جديدة من الأحرف وهكذا . ستننتج هذه العملية سلسلة من الأحرف مجسده لنظام مديد ، اضافة الى انه لا يوجد حد لعدد الأحرف المحصورة بين ورودين متتالين للحرف Z . لا تستطيع آلة متناهية الحالات بإمكانها تحقيق مثل هذه العملية .

يؤكد شومسكي انه لا يوجد حد معين لطول الجملة السليمة وفق القواعد في اللغة الإنكليزية ، ويضيف أن جمل اللغة الإنكليزية مرتبة بشكل ينفي دور الآلة المتناهية الحالات كمنتج وحيد لكل نصوص اللغة الإنكليزية . ولكن هل نستطيع فعلا اعتبار جملة طولها كيلو مترات على انها سليمة وفق القواعد سيما واننا علم ان أحدا ما لم ولن ينتج مثل هذه الجملة ، وحتى لو وجدت فستكون غير مفهومة .

ان تقرير مثل هذا الأمر لا يمكن بدون معايير معينة لتقرير سلامة النص وفق القواعد . يشير شومسكي الى ما هو سليم وما هو غير سليم وفق القواعد واعتقد ان معياره يستند الى ضرب من السياقية الطبيعية ، فالجملة حسب شومسكي سليمة وفق القواعد فيما اذا قيلت بصوت عالٍ وتقطيع واضح وأصدر عليها هذا الحكم شخص يتفوه بها او يسمعها ان الأمور التي تقض مضجع الآخرين يبدو انها لا تزجج شومسكي ربما لأنه يتحدث لغة إنكليزية متماسكة وسليمة وفق القواعد .

هل يمكن تضمين قواعد اللغة في آلة متناهية الحالات أو لا يمكن ؟ يطرح شومسكي شاهداً مقنعاً على خطأ محاولة انشاء الجمل بجمل الخيار التالي للكلمة تابعاً للكلمات التي سبقت . يستعيز شومسكي عن ذلك برؤية أخرى لإنشاء الجمل هي التالية :

نبدأ بشكل أو آخر من عدة نماذج يمكن ان تأتي الجملة وفقها ، مثلاً فعل يتبعه فاعل . يسمى شومسكي هذا الشكل الخاص : الجملة الأساسية ، ثم يستحضر احكام القواعد لتوسيع كل جزء من اجزاء هذه الجملة ، وقد يصل ذلك به الى جمل مختلفة مثل : قذف الرجل الكرة ، او : امسكت الفتاة القطة .

نلاحظ هنا ان فعل الخيار لم يمارس بشكل متسلسل عبر الجملة من بدايتها الى نهايتها ، بل تم اعتماد هيكل عام أو مخطط عام للجملة النهائية منذ البداية ، هذا المخطط هو الجملة الاساسية الذي نعبره الى اركانه المختلفة حيث يتم اختيار الكلمة المناسبة وفق كل ركن . ينحصر الخيار هنا عند كل عقدة من هذا الهيكل الاشبه بشجرة والذي تقع الجملة الاساسية منه عند الجذر .

لقد شرحت افكار شومسكي هنا بشكل غير كامل ووفق خطوطها العامة . فمثلا لدى اعتباره بعض اشكال الكلمات غير النظامية يحدد شومسكي اولا الكلمة الاساسية وشكلها الإعرابي العام ، ثم يطبق بعض الاحكام الإجبارية لبلوغ الشكل اللغوي الصحيح . وهكذا فإنشاء شومسكي المتفرع للجملة يعتمد بعض الاحكام الاختيارية التي تسمح بإجراء الخيار الحر الى جانب احكام اجبارية اخرى لا تسمح بأي خيار .

ان الفهم المفصل لشومسكي يقع خارج اهداف هذا الكتاب ويمكن الرجوع الى كتابه حول هذا الموضوع والمراجع الاخرى التي يشير اليها في كتابه .

ان على شومسكي ، طبعا ، ان يعالج مشكلة الجمل الفامضة ، مثل الجملة التالية : السيدة العالمة جعلت الروبوت أسرع خلال الوقت الذي اكلت به . لقد ابلغني مؤلف هذه الجملة ، وهو باحث في نظرية المعلومات ، ان هذه الجملة تحمل اكثر من ٤ معاني مختلفة في إطار اللغة العامية . ان هذه الجملة صعبة للغاية اذا اختيرت كنموذج للدراسة والتحليل .

قد نعتقد ان مرد الغموض هو المعاني المختلفة التي قد يقطعها كلمة أو اكثر ضمن نفس الإنشاء الإعرابي ، كقولنا مثلا : كان مجنوننا ، بمعنى انه كان غاضبا او انه كان قد فقد عقله فعلا ، أو قولنا : كان الطيار عالياً ، بمعنى انه خلق بطائره على ارتفاع عالٍ ، أو كان عالياً في رده على استشاره ما . يعطي شومسكي مثالا بسيطا عن جملة غير واضحة تماما ،

وسبب عدم الوضوح فيها هي احكام القواعد ، والجملة هي : صيد الصيادين ، وقد تفسر بمعنى الصيد الذي يجلبه الصيادون ، أو بمعنى آخر هو ان يقوم البعض بصيد الصيادين ، أي جعل الصيادين من جملة فرائسه .

يؤكد شومسكي ان تطبيق احكام تحويل مختلفة على جمل اساسية مختلفة يمكن ان يؤدي الى نفس السلسلة من احكام القواعد . مثلاً ، اذا اعتبرنا الجملتين : اللوحة تم رسمها بواسطة فنان حقيقي ، اللوحة تم رسمها بواسطة أسلوب جديد ، نلاحظ التقابل الإعرابي الدقيق بينهما ، إلا أن الاولى يمكن أن تنتج من تحويل الجملة التالية : لقد رسم اللوحة فنان حقيقي ، أما الثانية فلا يمكن استنتاجها من جملة لها نفس الشكل . عندما تكون الكلمات النهائية والعناصر الإعرابية النهائية نفسها ، تكون غامضة .

يواجه شومسكي المشكلة الكبيرة بأن الحدود الفاصلة بين السلامة وفق الإعراب وبين صحة المعنى هي حدود غير واضحة . مثلاً : الجملة : الأخضر عديم اللون ، هي جملة سليمة وفق الإعراب ولا معنى لها . هل يمكن للقواعد أن تمنع ربط بعض الصفات ببعض الأسماء أو بعض الأسماء ببعض الأفعال وغير ذلك ؟ فوفق خيار ما تكون التراكيب سليمة وفق الإعراب وعديمة المعنى ، وفي خيار آخر تصبح غير صحيحة من وجهة نظر الإعراب إلا أنها تؤدي معنى مفيداً .

وهكذا وضع شومسكي مخططاً لقواعد اللغة الإنكليزية يتضمن عند كل تفرع في عملية إنشاء الجملة خطى إجبارية وأخرى اختيارية . لا يمكن تنفيذ مثل هذه الخطى باستخدام الآلة المتناهية الحالات ، إلا أنه باستطاعة آلة أخرى فعل ذلك ، تعرف هذه الآلة بآلة تيورينغ وهي آلة منتهية الحالات أضيف إليها شريط تسجيل يمكن قراءة الرموز وكتابتها عليه ، وكذلك محيطها . تشكل العلاقة بين قواعد شومسكي وهذه الآلة مادة للدراسة في علم معاصر يعرف باسم الآئمة .

يجدر بنا ان نلاحظ أننا إذا فرضنا حداً أعلى لطول الجملة بالغاً ما بلغ من الكبر ، كان نجعله مساوياً لآلف أو مليون كلمة ، فإن قواعد شومسكي ستبقى متناسبة مع الآلة المنتهية الحالات . ان فرض حد أعلى لطول الجمل يبدو معقولا من الناحية العملية .

بعد ان يتم وضع مخطط عام او نموذج لقواعد كذلك الذي اقترحه شومسكي ، يبرز السؤال الهام : كيف يمكن تقدير الانتروبي وتحت أي ظروف ، تلك الانتروبي التي تقيس الخيار أو الرتبة لمصدر رسائل يولد النصوص اللغوية وفق احكام القواعد المعتمدة . يخص هذا السؤال الرياضي الحاذق العامل في مجال نظرية المعلومات .

لعله امر بالغ الاهمية ان نصيغ احكاما للقواعد معقولة وقابلة للعمل ونفقا يمكن ان تكون تلك الاحكام ما اقترحه شومسكي تحت اسم : قواعد الانشاء باستخدام اجزاء الجمل ، او يمكن ان تكون متضمنة في اقتراحات مناسبة اخرى . يحتمل ان تكون تلك القواعد غير كاملة اذا هي فشلت بانتاج او تحليل التراكيب الواردة والمقبولة وفق القواعد اللغوية المعروفة ومما هو اكثر اهمية ان عمل هذه الاحكام يجب ان يتناسب مع الانشاء اللغوي الذي ينجزه كائن بشري ، وان يكون بسيطا لدرجة يمكن معها للكمبيوتر ان يقوم بتوليد وتحليل النصوص . اعتقد ان استخدام الكمبيوتر ضروري في تناول مشاكل النصوص اللغوية سواء من حيث انشائها او مواصفاتها الاحصائية .

يتناقض الدارسون في مواقفهم من انجازات شومسكي ، فبعضهم يرى فيها الجانب الاهم من قواعد اللغة الانكليزية بينما يشعر الآخرون ان طريقته في توليد الجمل يجب ان تعدل او ربما تحدد فيما اذا سم التخطيط لاستخدامها في التوليد الفعلي للجمل المنتجة من قبل بني البشر يغمر الانسان شعور قوي ، لدى استماعه الى متحدث آخر او قيامه بالحديث هو نفسه ، بان الجمل تنبثق بشكل متماسك من البداية وحتى النهاية ، واكثر من ذلك فان لدى كل منا الانطباع بان كائناً بشرياً من كان

لا ينتج جملة بتطبيق آلية جاهزة في دماغه لدى تفوهه او كتابته كل كلمة ،  
وعوضا عن ذلك يتعامل مع تلك الآلية بشكل عفوي وعبر سياق انتاجه  
للتصوص اللغوية .

لا اعتقد ان الدراسات المنصبة على اللغة والقواعد والاحصائيات  
المتعلقة بهما ستمطينا في المستقبل القريب معلومات جديدة عن طبيعة  
اللغة والانسان . واذا رغبت بقول ما هو اكثر خصوصية من ذلك ،  
فعلي تجاوز المعارف الحالية ، سواء اكانت معارفي او معارف الآخرين .

لا يقتصر عمل القواعد على بسط الاحكام النازلة لعملية ضم الكلمات  
الى بعضها بهدف تكوين جمل مفيدة ، بل يتعدى ذلك الى تصنيف  
الكلمات . في زمر مختلفة وفقا للاماكن التي يمكن ان تظهر . عندها في  
النصوص المنشأة على اساس تلك القواعد يعد اللغويون مثل هذا  
التصنيف استنادا الى القواعد الصرفية ودون استخدام مفهوم لمعنى .  
وهكذا فكل ما نتوقعه من القواعد بناء جمل صحيحة من حيث الشكل ،  
وهذا يشمل الجملة التالية مثلا : نزل المطر على الارض باستخدام المصعد  
ان تصنيف الكلمات وفق القواعد الى اصنافه مختلفة مثل الاسماء ،  
الصفات ، والافعال ، ليس اطلاقا دليلا الوحيد لانشاء النصوص  
اللغوية .

ماذا يحكم اختيار الكلمات عند انشاء جمل سليمة وفق القواعد ،  
ولا نقصد هنا الانشاء المنفذ من قبل آلة ، بل ذاك المناطق بكائن بشري ،  
والذي تعلم من خلال خبرته الطويلة الكتابة والحديث وفق اصول  
القواعد . لا يمكن الاجابة عن هذا السؤال بالجوء الى مفهوم المعنى دون  
تمحيص كاف ، اذ ان المعايير المستخدمة في انشاء النصوص اللغوية هي  
معايير معقدة للغاية . لقد درس الفلاسفة وعلماء النفس استخدام  
الكلمات واللغات لاجيال متعاقبة واقاموا حولها النظريات ، ولكن يبدو  
ان استنتاج اي مقولة جديدة في هذا المجال هو امر صعب ناهيك عن  
امكانية ان تكون تلك المقولة صحيحة على الاطلاق . نجد في كتابات  
الاسقف بركلي من القرن الثامن عشر المتعلقة باستخدام اللغة آراء مقولة

يصعب على الباحث تقديم آراء جديدة دون العودة إليها وإيفائها حقها  
كأساس في أبحاث اللغة .

يجد الشاعر الاصيل صعوبة بالغة في نظم شعره ، فعليه من جهة  
انتقاء الكلمات ذات الجرس الموسيقي المقبول والتي تؤدي المعاني المطلوبة .  
الى جانب حفاظها على الوزن والقافية المعتمدين . لذا لا يمكن ان تقسم  
كلل الاشعار وفي نفس السوية فمنها ما يحقق الايقاع المطلوب الى جانب  
الوزن والقافية ، بينما يخلو في نفس الوقت من اي معنى .

ان انتقاء الكلمات ذات الجرس الموسيقي يتجاوز الشعر الى انواع  
الكتابات الاخرى ، خاصة اذا قصد الكاتب التأثير بشكل ما على القارئ ،  
وقد يعتمد بعض الكتاب لاستخدام كلمات معينة ، بغية تحقيق هذا  
الهدف كالخوف والحدق والحب وغيرها . تحرك كلمات مختلفة مشاعر  
كل منا في ظروف متباينة ، ويتعدى فعل الكلمات في بعض الثقافات  
الافراد الى المجموع ، اذ تؤثر فيهم جمل ومقاطع محددة ، تماما كما  
تؤثر فيهم احداث متكررة او اصوات او مشاهد ذات مغزى .

لم يذكر بركلي نوعاً معيناً من الانفعال هو الانفعال المرتبط بالفهم  
وعملية المعرفة . ان تفوهنا بنماذج دارجة ومتعارف عليها من الكلمات  
في معرض مواجهتنا لبعض القضايا الغير واضحة ، يمكننا من ربط  
انفعالاتنا الاليفة النافذة مع ارتباطنا وحيرتنا ازاء الحياة ، التاريخ ،  
طبيعة المعرفة ، الوعي والموت واضح ان هذه الفلسفة تعتمد الكلمات  
المتداولة لذا فان تقييمها يجب ان يستند الى اهمية مصداقية الشاعر  
الانسانية باكثر مما تستند الى مفهوم المعنى في اللغة .

يمكن ان يقضي احدنا اياما بكاملها في تفحص امثلة عن دوافع انتقاء  
الكلمات ، الا انه سيعود الى مشكلة المعنى على الدوام ، فكل شيء يبدو  
ضائعا بدون المعنى مهما كان ذلك المعنى لا يملك الشعر الصيني او النكتة  
الصينية الا اثرا ضئيلا علي الا اذا كان بإمكانني ان اتفهم اللغة الصينية  
بنفس الطريقة والالية اللتين يتعامل الصينيين بهما مع لغته .

اعتقد انه من المناسب ان نعتبر اللغة نوعا من رموز الاتصال على الرغم من اعتراض كولين شيري ، وهو باحث في نظرية المعلومات . الا ان ذلك لا يعني ان اللغة هي نظام رموز سهل يتم وفقه وببساطة استبدال الفعل بالكلمة ، انها اشبه بأساليب الترميز القديمة حيث كانت تعتمد قائمة من الكلمات تصلح كل منها لترميز كلمة معينة او حرف محدد ( وذلك لمنع التكرار ) مرة اخرى ليست اللغة ببساطة هذه الاساليب ، فقوائمها تتداخل بعكس اساليب الترميز القديمة ، كما ان القاموس اللغوي لاي شخص يختلف عن القاموس اللغوي لاي شخص آخر ، مما يزيد في الارتباك والتشوش اذا اعتبرنا ان اللغة هي نظام ترميز غير كامل ، فعلى ان نعزو المعنى في نهاية المطاف الى الشخص ، ولهذا السبب ، ربما ان بعضنا يطرح السؤال التالي : ماذا تعني ، على الرغم من سماعه كلام الشخص الاخر بوضوح . يسمى الدارسون في هذا السياق ، لفهم مقاصد كتاب الذين قضوا منذ وقت طويل ، كما تسعى المحاكم لاستيعاب مقاصد الجهة المشرعة قبل استخدام النصوص القانونية .

لنفرض جدلا انني اقتنعت بكذب احد الاشخاص عندها احمل كلماته معان يحاول من خلالها تملقي او خداعي . بينما اذا اكتشفت ان الكمبيوتر استطاع صياغة جملة مفيدة استنتج على الفور ان الكمبيوتر يعمل بشكل جيد .

لا اظن ان مناقشتنا هذه هي من قبيل المحاكمة ، اذ ان ما يدفعنا الى هذه الاعتبارات عن المعنى ، افتراضنا الاول بان اللغة هي جملة ترميز للاتصالات غير كاملة ، وتستخدم في بعض الاحيان بشكل غير نسيق . اما الامر الاكيد ، فهو اننا ما زلنا بعيدين جدا عن الاحاطة الكاملة بهذه القضايا .

وعلى كل حال ، تمتلك الجمل السليمة وفق الاعراب معنى شكليا بصرف النظر عن النية او القصد . واذا كان في حوزتنا نظام اعراب مرض فيمكن للآلة استخدامه لبيان العلاقات بين مكونات الجملة كالفعل والفاعل

وغيرها ، إما المرحلة التالية فتركز في البحث عن المعنى الشكلي للجملة ، ويعني ذلك ربط مختلف الكلمات بالاشياء على تنوعها والخصائص والاعمال او العلاقات في العالم من حولنا ، بما في ذلك المجتمع الانساني ونظام معرفته .

لا نجد اي صعوبة من خلال سياق الاتصالات عبر حياتنا اليومية ، في ربط الكلمات المستعملة بالاشياء والخصائص والافعال والعلاقات ، مثلاً لا يمكن لاحد ان يشتكي من غموض جملة تنطوي على طلب اغلاق النافذة كقولنا : اغلق النافذة الشمالية ، او جملة اخرى تثبت حقيقة معروفة مثل : الملك لويس ميت . ان هاتين الجملتين بسيطتان فعلاً وتعلقان بمواضيع بسيطة من المحيط ، فجميعنا نعلم ما معنى نافذة واين هي جهة الشمال ، كذلك الاحتياج الامر معرفة معمقة بالتاريخ بغية الحديث عن موت الملك لويس ، فكل منا قد سمع بحادث موت او شاهده ، أما عن الملك لويس فهناك عدد كبير من الملوك بهذا الاسم . تبقى هنا قضية إجرائية بحثية ، إذ قد لا نسمع الجملة او ندرك جيداً للوهلة الأولى ، فيطلب السامع ببساطة اعادةتها .

ولكن ماذا لو تصورنا الانسان الاول : انسان الكهوف وهو يواجه طلباً كهذا : اغلق النافذة الشمالية ، لا شك سيكون في حيرة من امره ، تماماً كحالنا الآن ازاء التساؤل الكبير : هل الفيروسات حية او ميتة .

يبدو أن معظم الارتباك والحيرة المتسبب عن محاولة ربط الكلمات بمكونات العالم قد نشأ من محاولات الفلاسفة بدءاً من افلاطون وحتى لوك التي انصبّت على البحث عن المعاني القابلة لافكار مثل : نافذة ، قطعة ، أو ميت ، وتركز ذلك البحث على ربط تلك الافكار بافكار اخرى اكثر عمومية أو بأمثال نموذجية . يفترض فينا وفق ذلك ، ان نميز النافذة بمشابهتها لفكرة عامة عن النافذة : لنافذة نموذجية في الواقع ، وان القطعة كذلك بمقارنتها مع قطعة نموذجية تنطوي على كل ميزات « القطعية » . يشير بركلي الى ان الفكرة المجردة عن المثلث او المثلث



المثال يجب في نفس الوقت الا يكون حاداً أو قائماً أو متساوي الاضلاع أو متساوي الساقين ، انه كل هذه الاشياء وليس أحداً في نفس الوقت .

عندما يعلن الطبيب موت أحد الاشخاص فانه انما يفعل ذلك استناداً لبعض المؤشرات الظاهرة التي لا يجدها في الفيروس . وأكثر من ذلك ، فعندما يشخص الطبيب مرضاً ما ، لا ينطلق في عمله من مقارنة حالة المريض مع صورة نموذجية للمرض . ان ما يتناوله الطبيب لدى مواجهته المريض هو المظهر العام للمريض ، اضافة لتفاصيل أخرى كدرجة الحرارة والنهض ولون الجلد والتهاب الحلق وغيرها ، كذلك يأخذ الطبيب بعين الاعتبار بعض العلامات التي قد يلفت المريض نظره إليها . ترتبط بعض الاعراض والتظاهرات بمرض معين ، كما تفضي التحاليل المخبرية والدراسات المفصلة الأخرى الى المفاضلة بين الامراض التي تشترك في اعراض متشابهة .

يحدد عالم النبات ، وبشكل مماثل ، صنف معين من النباتات ، سواء اكان معروفاً أم لا وفق قائمة من المواصفات قد يتواجد بعضها بينما يكون البعض الآخر غائباً ، كالحجم واللون ومساحة الاوراق وتوضعها وغير ذلك . تلعب بعض المواصفات دوراً حاسماً في التفريق بين النباتات ، مثلاً خصائص اوراق النباتات ذات الفلقة وخصائص اوراق النباتات ذات الفلقتين ، بينما لا يكون لبعض المواصفات الأخرى ، كحجم الورقة مثلاً ، الا دوراً موجهاً وحسب . يخرج التحليل النهائي بالباحث وقد كون قناعة انه كان على حق ، أو على الأقل انه على استعداد للاقتناع انه كان على حق ، وأخيراً يمكن أن يكون النبات وبساطة من صنف جديد .

وهكذا يوضح النشاط اليومي للطب وعلم النبات غياب المرض النموذجي أو النبتة المثالية بالمقارنة مع المعايير النفعية الواقعية . وبدلاً من ذلك ، تتوفر قوائم من المواصفات ، لبعضها امكانية التقرير ، وبعضها الآخر صفة التوجيه وحسب .

تعزيزت أهمية هذه الملاحظة وبشكل قوي من خلال العمل الجاري حالياً لحمل الآلة على تنفيذ مهمات التمييز والتصنيف . لقد أخطأ الباحثون الأوائل باتباعهم آراء بعض الفلاسفة فحاولوا تطبيق فكرة مقارنة الحرف مع حرف نموذج أو المخطط الموجي للصوت ، مع مخطط موجي مثال ، وكانت النتائج مروعة . فقد تم تصميم آلة للمقارنة اسميت اودري كانت مملوءة بالذاكرات ومخازن المعلومات ، واستطاعت تمييز الارقام المنطوقة بأصوات مختلفة ، إلا أن أخطائها كانت كبيرة جداً . نستنتج بذلك أن الدماغ الانساني لا يعمل وفق طريقة المقارنة مع النماذج إلا في حالات بسيطة محدودة ، ناهيك عن احتمال أن عمله قد لا يكون بهذه الطريقة إطلاقاً .

يقوم الباحثون الأكثر تقدماً في ميدان الإدراك بدراسة المزايا الرئيسية والنقاط البارزة ، وكمثال على ذلك نعتبر الحرف ن فنصفه يكون نصف دائرة دون زوايا أو تغيرات في الانحناء ، تملوها نقطة .

بنى ل. د. هارمون عام ١٩٥٩ في مخبر بيل جهازاً بسيطاً يزن عدة كيلو غرامات كان بإمكانه التمييز بين الارقام العشرية . ١ ، ٢ ، ٣ ، ٤ ، ٥ ، ٦ ، ٧ ، ٨ ، ٩ إذا كتبت ليس بالرموز وإنما بالكلمات وبخط واضح لم يكن ذلك الجهاز ليقارن الكتابة بنماذج مثالية ، بل كان يصيغ استنتاجاته اعتماداً على ملاحظات محددة : كم مرة ارتفع القلم وهبط عبر خطوط معينة أثناء الكتابة ، هل هناك نقاط ، وخلاف ذلك .

لا يشك أحد إطلاقاً أن الكلمات تشير الى صنوف من الأشياء والأفعال وغيرها . يحيط بنا ويتداخل في حياتنا أصناف كثيرة من الأشياء والأفعال نربط بها عادة كلمات معينة . تتضمن هذه الأصناف أشياء مثل ( أزهار دوّار القمر ، الفاصولياء ) ، وحيوانات مثل ( القطط ، الكلاب ) وآلات مثل ( السيارات ، الراديو ) ، ومنشآت مثل ( أبراج ، أبنية ) والبسة مثل ( قمصان ، بيجامات ) وهكذا . كما تتضمن أفعالا معقدة مثل لبس وخلع الثياب ( يحاول شاردي الدهن ، بما فيهم مؤلف هذا الكتاب ،

اثبات انهم يستطيعون القيام بهذه الاعمال بشكل لاواعي ( وايضاً شد اربطة الاحذية ) ( ويتميز هذا الفعل بصعوبة تنفيذه من قبل الاطفال ) ، الى جانب الطعام ، قيادة السيارة ، القراءة ، الكتابة ، جمع الاعداد ، لعب كرة القدم او كرة اليد ( وهي افعال تنطوي على مهارات جزئية ) ، واخيراً الاستماع الى الموسيقى وغيرها وغيرها ....

اميل الى الاعتقاد بان ما يحدد صنفاً معيناً من الاشياء ليس النموذج او المثال ، بل قائمة من المميزات ، وهذا ينطبق على الافعال والعلاقات . لا نتوقع ان مثل هذه القوائم ستمكننا من تجزئة خبراتنا في زمر مغلقة منفصلة . بينما نجد مثل تلك الامكانية في لغة العلم سيما عندما نتناول قطاعاً ضيقاً من الخبرة ، الا ان خبرة الحياة اليومية تتجاوز مثل هذا الوضع ، فتقسم الخبرة فيها امر مستحيل الا اذا كانت الاقسام الناتجة غير شاملة وكذلك متداخلة وغير منفصلة . اعتقد على الرغم من ذلك انه بواسطة قوائم المميزات يمكننا تعريف الابواب ، الثوافد ، القطط ، القروذ ، واشياء الحياة اليومية الاخرى . كما اميل الى الاعتقاد ان نفس الاسلوب سيمكننا من تحديد الافعال المألوفة كالركض والقفز ، وكذلك الرموز المستخدمة في الكتابة والكلام اي الكلمات .

وهكذا الخص وجهة نظري بالتأكيد على ان مثل هذا التناول قد يحقق آمالنا بجعل الآلة قادرة على تصنيف الاشياء والافعال بدلالة اللغة ، او تمييز وتفسير اللغة بدلالة فعل ما او لغة اخرى . واعتقد اكثر من ذلك ان الكلمات التي ليس لها قائمة ميزات محددة ذات جذور واضحة في خبرات الحياة اليومية ، مثل تلك الكلمة يجب ان نقف معها موقف الحذر .

اذا دفعنا طموحنا لفهم اللغة بطريقة تمكننا من جعل الآلة قابلة للتعامل مع اللغة بنجاح كامل ، فعلينا ان نبحث عن قواعد واضحة للغة ، كما ان علينا اكتشاف العلاقات التفصيلية التي تربط الكلمات بالعالم من حولنا ، الا ان ذلك كله ليس كافياً . اذا اردنا التعامل مع

الجمال على أنها مؤدية لمعانٍ معينة ، فيجب أن نبحث عن تلك المعاني في الواقع ، بكلمة أخرى ان على هذه الجمال أن تترجم بصدق الحياة كما نعيشها .

لا تقدم الحياة أشياء جديدة وأفعال جديدة في كل يوم ، اذ أن الجديد ، في واقع الامر ، يصنع من الأشياء المعتادة والأفعال المألوفة ولكن في سلاسل أكثر تعقيداً ووفق ترتيب مختلفة وزمر متباينة . نحقق عملية التعلم في بعض الأحيان بإضافة أشياء أو أفعال أو تراكيب من الأشياء والأفعال الى جمعة خبراتنا ، وهكذا نفني أو نغير حياتنا . وقد ننسى الأشياء والأفعال في أحيان أخرى .

تتوقف أفعالنا الخاصة على الأشياء والاحداث من حولنا . نتفادى سيرة في الطريق ( هنا نميز سلسلة من الأفعال المعقدة ) . عندما نمطس، نتوجه الى أقرب مصدر مائي ونشرب ؛( مسلسل آخر ولكن متواتر من الأفعال المعقدة ) . واذا تواجدنا في منطقة مكتظة فلربما قد ندفع الآخرين بالكثف كما فعلنا سابقاً . إلا أن مصادرنا المعلوماتية لا تقتصر على الخبرة المباشرة ، وكذلك فتأثيرنا على الآخرين لا يُحد بالدفع والمزاحمة ، اذا اننا نمتلك اداة قوية لتحقيق اهدافنا : اللغة والكلمات .

نستخدم الكلمات لتتعلم العلاقات بين الأشياء والأفعال ولنتذكرها ، وكذلك لاصدار التعليمات للآخرين وتلقي التعليمات منهم ، وأخيراً للتأثير على من حولنا بشكل أو بآخر . تتوقف فعالية الكلمات على التطابق بين أسلوب فهم السامع لها وقصد قائلها ، أي على قابلية السامع لربط الكلمات مع نفس الأشياء والمهارات . أما اذا طلبنا من شخص ما القراءة أو جمع الاعداد ، في الوقت الذي لم يسبق لهذا الشخص أن مارس القراءة أو الجمع ، أي انه لم يسبق له أن اكتسب هذه المهارات، فان طلبنا باختصار سيكون عديم الفائدة . وبالمثل سيكون مضيعة للوقت والجهد ان نطلب من شخص آخر صيد الرويط بواسطة التيقذب ، اذا هو لم ير هذين الشينين سابقاً .

واكثر من ذلك ، فلكي تؤدي الكلمات فائدة لمستخدميها ، يجب ان تشير الى سلسلة واقعية أو ممكنة من الافعال . وهكذا سيبدو من غير المفيد ان ننصح شخصاً ما بالسير من لندن الى نيويورك بعد الظهر فور انتهائه من تناول وجبة الساعة السابعة .

وهكذا لا يقتصر اداء اللغة للمعاني على سلامة القواعد وعلى مقابلة الكلمات للاشياء والافعال وغيرها ، بل يعتمد أيضاً على تركيب العالم من حولنا . تضمننا هذه الحقيقة في مواجهة صعوبة بالغة اذا حاولنا ترجمة نص من لغة الى لغة أخرى وتصورنا ان بمقدورنا الحفاظ على جوهر المعنى الوارد في النص المترجم .

ان احد اهم عناصر هذه الصعوبة هو الاختلافات في التصانيف ، فمثلاً يمكن الناطق بالانكليزية من استخدام كلمة القدم ، او مصطلح الرجل السفلى ، بينما لا يرد في اللغة الروسية الا كلمة واحدة بالمقابل . يملك الهنغاريون عشرين اصبعاً ، أو ان الكلمة لديهم هي نفسها لاي شيء ملحق . اذا تحدث اي منا عن الكلاب ، فهو يعني الكلب ذكراً كان ام انثى ، بينما كان الاقدمون اكثر حرصاً على التمييز بين الكلب والكلبة . يقال ان شعوب الاسكيمو تميز بين انواع من الثلج ، واذا رغبتا بفهم مقاصدهم ، فعلينا تعديل لغاتنا بما يستوعب صفات الانواع المختلفة من الثلج ، الا ان هذه الصفات ستكون ذات اهمية ضئيلة بالنسبة لنا ، لان تصنيف الثلج لم يبرز كقضية هامة في حياتنا . وهكذا فاجزاء العالم المشتركة بين ناطقي اللغات المختلفة والتي تحمل لهم المعاني على السواء ، تقسم الى زمر متباينة وفق الناطقين بكل لغة . تستحيل الكتابة باستخدام لغات مختلفة لكلمات او جمل بسيطة تقابل نفس المجال من الخبرة .

وتبقى بعد ذلك مشكلة اكثر عمقا ، اذ ان الكلمات المأخوذة من لغات مختلفة والمقابلة لنفس الخبرة لا تغطي نفس المساحة من الخبرة . كيف يمكن ان ينقل المترجم الجملة التالية : ربط شريط الحذاء ، الى لغة

قوم يستخدمون احذية بدون شرائط . لن تحل المشكلة بتوصيف معتد من جانب المترجم . لربما يكون هناك معادل ثقافي في اللغة الاخرى . كيف يمكن أن نوفق بين ما قد نصادفه في قصة قديمة تروي عن شخص ما انه بنى بيتاً ، فوق الكاتب عنى ذلك الحفر والتقر في شجرة كبيرة ، او كتلة صخرية صلدة ، بينما يعني بناء البيت في عصرنا استقدام المهندس والبناء والحديد والاسمنت وغيرها .

على انه من المرجح أن تكون الترجمة بين لغتين متقاربتين ناجحة بقدر ما اذا جرت تلك الترجمة على أساس مقابلة الكلمات او مقاطع الجمل ، وان كانت بعض هذه المحاولات قد أدت الى ترجمة مقطع مثل: ابعد من النظر ووراء حدود العقل الى المقطع التالي : ابله اعمى . اما اذا كانت الفرق بين الثقافات واللغات كبيرة فان المترجم يفكر اولاً بمعاني الكلمات وفق الاشياء والافعال والانفعالات ثم يحاول اعادة كتابة هذه المعاني باللغة الاخرى . ومن الممكن أن الثقافة المرتبطة باللغة الاخرى هذه لا تنطوي على مكافئات قريبة للاشياء او الافعال الواردة في النص الاصلي، عندها يجد المترجم نفسه امام حائط مسدود .

بالضخامة المشاكل التي سيواجهها من يحاول بناء آلة للترجمة . انه لن يستطيع تحقيق مراميه دون تأهيل الآلة بشكل ما للتعامل مع ما اشرنا اليه سابقاً على انه الفهم . لا يقتصر دور الفهم في مجال الترجمة من لغة لاخرى . ان كاتب السيناريو الذي يستطيع وبامانة ترجمة ونقل اساسيات مشهد موت عمة في اومسك الى مشهد موت اب في لوس انجلوس ، سيفشل بشكل متكرر اذا هو حاول اعادة صياغة جملة علمية ، ببساطة لان يعرف الكثير عن الحزن والقليل عن العلم .

نواجه الآن كلمة الفهم ، بعد أن علقنا لفترة وبشكل مؤلم مع كلمة المعنى . يبدو لكلمة الفهم معنيان . اذا فهمنا الجبر او علم التفاضل والتكامل ، فنستطيع استخدام تقنيتهما في حل مسائل لم نواجهها سابقاً وبرهان نظريات لم يسبق أن برهنت . يتجلى الفهم هنا بقوة

الفعل والخلق وليس مجرد التكرار . يمكن أن نقول في هذا المعرض أن الكمبيوتر يستطيع الفهم إلى حد ما ، إذ أن باستطاعته برهان بعض النظريات في المنطق الرياضي إذا تمت برمجته لهذه الغاية . إلا أن هناك جانباً انفعالياً للفهم إذا استطعنا برهان نظرية ما بطرق متعددة وضممنها إلى غيرها من الحقائق والنظريات بهدف التنسيق ، كذلك إذا تناولنا موضوعاً ما من مناهج مختلفة بغية اكتشاف علاقة طرق التناول المختلفة هذه مع بعضها ، قلنا في كل الأحوال أننا نتفهم القضية بعمق ، وغمرنا شعور عميق وحار بإمكان تعاملنا معها . لربما شعر بعضنا بهذه الحرارة في أحيان متفرقة دون أن تتظاهر القابلية لديهم ، إذ اتضح لدى الاختبار زيف دافئ المشاعر التي غمرتهم للحظات .

قادنا تناول اللغة من منظور نظرية المعلومات إلى معارج مختلفة من أمواج الكلمات حيث واجهنا أحكام القواعد غير الكاملة واقتحمنا مجاهل المعنى والفهم . يظهر كل ذلك المدى الواسع الذي قد يندفع المرء فيه بسبب الجهل . سنظهر بمظهر مضحك فعلاً ، إذا حاولنا التأكيد على أن نظرية المعلومات أو أي شيء آخر قد مكنتنا من حل مشاكل اللغويات ، المعنى ، الفهم ، وفلسفة الحياة . وما يمكننا قوله في أحسن الأحوال أننا نندفع قليلاً أبعد من القيود الميكانيكية للغة في محاولة كشف الخيارات التي تسمح بها اللغة . أن ذلك يلفت الانتباه إلى مسائل تتعلق باستخدام ووظيفة اللغة ، إلا أنه لا يبرهنها . وأخيراً فربما يفضل القارئ مشاركتي جهلي المقدم مجاناً فيما يتعلق بهذه الأمور أو لعله يود الاستمتاع بجهله الخاص .







## الفصل السابع

### الترميز الفعال

لن نستطيع ممارسة فهم الطبيعة مرة أخرى كما فهمها قدماء اليونان . إذ أن التفسير العام للظواهر المألوفة من خلال عدد قليل من المبادئ الشاملة لم يعد مرضياً البتة . أننا نعلم اليوم الكثير ويجب أن نفسر الكثير مما فات قدماء اليونان . كما يجب أن نحرص على ملائمة نظرياتنا للمجال الواسع من الظواهر التي حاولوا تفسيرها . نؤكد أنهم زودونا بدليل عمل مفيد وليس بأسلوب عقلنة العالم . تتجلى عظمة ميكانيك نيوتن في أنها مكنت من التنبؤ بمواقع الكواكب والأقمار الصناعية وكذلك من فهم مجموعة من ظواهر الطبيعة الأخرى . نحن اكدون أن ميكانيك نيوتن لم يكن السبب في تحريك ودعّم الفهم الميكانيكي للحياة والكون .

يشعر الفيزيائيون المعاصرون أنهم راضون تملأ عن اعتقادهم المتضمن إمكان تفسير كل خواص المادة ( عدا النووية منها ) بواسطة قوانين الميكانيك الكوانتي ، بما فيها الخواص الفيزيائية ، الكيميائية ، والحيوية ، وذلك باستخدام فرض بسيط ينص على وجود الإلكترونات وعدة أنواع من نوى الذرات . إلا أن ما يحير ويربك فعلاً أن الجملة الفيزيائية الوحيدة التي حسبب خواصها ودرست بشكل كامل هي ذرة الهيدروجين المنعزلة .

يستطيع الفيزيائيون تفسير ظواهر فيزيائية أخرى بدقة بالغة والتنبؤ بها ، كما يستطيعون تناول ظواهر فيزيائية مختلفة بطرق نصف حسابية . إلا أن التناول النظري الدقيق دون العودة الى المعلومات التجريبية ما زال قاصراً بالنسبة لمجموعة من الظواهر الحرارية ، الميكانيكية ، الكهربائية ، والكيميائية وعماد هذا التناول النظري هو كما ذكرنا الميكانيك الكوانتي المطبق بشكل رئيسي على النوى والالكترونات . إن تتبع العمليات البيولوجية المعقدة حتى أصولها في المبادئ الكوانتية يبدو أمراً بالغ الصعوبة لدرجة يبدو معها الميكانيك الكوانتي قليل الأهمية بالنسبة للبيولوجيا . ويبدو الأمر كما لو أننا وضعنا اليد على فرضيات قطاع هام من الرياضيات ولم نستطع إلا برهان بعض النظريات البسيطة .

وهكذا يحيط بنا في العالم جملة معقدة من الظواهر والمشاكل تتجاوز آمالنا بإمكان احاطتها بنظرية شاملة واحدة منها كانت تلك النظرية صحيحة من حيث المبدأ . لقد ظلت مشاكل العلم التي نربطها عادة بالفيزياء هي الأكثر إثارة وتحريكاً حتى وقتنا هذا بالمقارنة مع جوانب الطبيعة الأخرى التي ما زالت تحيرنا ، وإن كان قد دخل مؤخراً حلبة الاهتمام علما جديداً : الكيمياء الحيوية وعلم وظائف الأعضاء .

اعتقد ، على كل حال ، أن المشاكل التي يطرحها التطور التكنولوجي المعاصر لا تقل تحدياً عن تلك التي نواجهها في الطبيعة . ما الذي يمكن أن يكون أكثر إثارة من محاولتنا كشف إمكانات الكمبيوتر في برهان النظريات أو في مماثلة أنماط من السلوك تعودنا على وصفها بالإنسانية . لا تقل تحدياً مشاكل الاتصالات الكهربائية . لقد أوت القياسات الدقيقة بوسائط كهربائية الى إحداث ثورة في فيزياء الصوتيات . كما افتتحت الدراسة المرتبطة بالاتصالات الهاتفية عهداً جديداً في دراسة السمع والمخاطبة إذ تبين أن الإنكار السابقة المتعلقة باللغويات غير كافية . هذا هو حقل دراسات نظرية الاتصالات حيث تتلاطم عشوائيا الجوانب الكثيرة للجهل الجديد والقلة الشحيحة المتوفرة من المعلومات .

إذا كان على نظرية الاتصالات أن تؤخذ على محمل الجد ، كما هي الحال مع قوانين نيوتن ، فعلى هذه النظرية أن تقدم لنا دليلاً جيداً فيما يتعلق بمشاكل نظرية الاتصالات ، ويجب أن تبرهن كذلك أن فيها مادة حقيقية ومستمرة تتجسد في بلوغ مستويات عالية من الفهم والقوة . وكما هو متوقع فإن البحث عن هذه المادة إنما يجب أن يتم في مجال الإرسال الدقيق والفعال للمعلومات . إن هذه المادة موجودة فعلاً ، وكما رأينا فقد وجدت فعلاً وبشكل غير مفهوم بالكامل حتى قبل أن يوحدها عمل شانون ويجعلها سهلة الإدراك .

نحتاج فهماً أساسياً وجديداً لمتابعة موضوع الإرسال الدقيق للمعلومات ، وهذا سيكون موضوع الفصل القادم . إلا أن الفصول السابقة قد وضعتنا في موقع يمكننا من شرح بعض جوانب الإرسال الفعال للمعلومات .

وجدنا أن انتروبي مصدر المعلومات مقدرة بالبيت لكل رمز أو لكل ثنائية تعطينا قياساً لعدد الأرقام الثنائية ، لعدد نبضات القطع والوصل لكل رمز أو لكل ثنائية ، الضرورية لبث رسالة . نحتاج بعد معرفة عدد الأرقام الثنائية الضرورية للترميز والإرسال ، لاكتشاف طريقة عملية للترميز لا تستخدم من الأرقام الثنائية وفي أسوأ الأحوال إلا ما يزيد قليلاً عن هذا العدد الأصغري .

تقضي المستجدات في الرياضيات ، العلم ، أو الهندسة ، وعلى الدوام بالبحث عن طرائق ميكانيكية شاملة لحل المسائل . تنبع أهمية هذه الطرائق من أنها تبرهن على إمكانية حل المشاكل ، إلا أنها لا تبدو عملية في حالة القضايا المعقدة ، كما أنها تكون غير مجدية إطلاقاً في بعض الأحيان . ونضرب مثلاً على ذلك توفر الحل الرياضي الدقيق لمعادلة الدرجة الثالثة ، إلا أن أحداً ما لا يستخدمه في حالة المسائل العملية ، ويستخدم عوضاً عنه طريقة تقريبية مناسبة للمسألة المطروحة .

إن الشخص غير المبتدئ يفكر طويلاً في مسألة معينة عليه يجد طريقة لتناولها أفضل من مجرد التطبيق الآلي لما تعلمه . لنرى الآن كيفية تطبيق ذلك على نظرية المعلومات ونعتبر أولاً حالة مصدر متقطع يولد سلسلة من الرموز أو الأحرف .

رأينا في الفصل الخامس كيفية حساب الانتروبي المصدر باختبار الاحتمالات النسبية لورود تراكيب الأحرف المختلفة . كلما ازداد طول التركيب تقترب القيمة المحسوبة من الانتروبي الحقيقية أكثر وأكثر . ويختلف الدقة المطلوبة حسب الحالة الخاصة المعبرة ، فقد يشكل التركيب المكون من ٥ أو ١٠ أحرف أو ربما ١٠٠ حرف التقريب المطلوب للانتروبي .

رأينا أيضاً أن تجزئة الرسالة في تراكيب متتالية من الأحرف لكل تركيب منها احتمال ورود خاص به ، ومن ثم استخدام طريقة هوفمان في ترميز هذه التراكيب بأرقام ثنائية ، نقول ، أن هذه التجزئة وما تبعها أدت إلى قيمة معينة لعدد الأرقام المخصصة لكل حرف وأن تلك القيمة اقتربت من الانتروبي أكثر بزيادة عدد الأحرف المساهمة في تشكيل التركيب .

هذا هو نموذجنا الميكانيكي السهل ، فلماذا لا نستخدمه ببساطة في كل الحالات ؟

نطرح الحالة البسيطة التالية ، بهدف تبين أحد الأسباب . نفرض أن مصدر رسائل معين يولد الرمز . أو الرمز ١ ولاحتمالين متكافئين ثم يكرر الرمز المولد مرتين قبل أن يعود مرة أخرى إلى الخيلين الرمزين ، وهكذا تبدو الرسالة المولدة من قبل هذا المصدر على الشكل :

١١١ ٠٠٠ ١١١ ٠٠٠ ١١١ ٠٠٠ ١١١ ٠٠٠ ١١١ ٠٠٠ ١١١ ٠٠٠ ١١١ ٠٠٠ ١١١ ٠٠٠



إذا تقدمنا بألية ميكانيكية في عملية ترميزنا للنصوص الانكليزية بشكل اكثر كفاءة ، لقمنا بترميز ازواج الأحرف ثم تراكيبها الثلاثية ، وهكذا . إلا أن هذه الطريقة ستفضي الى ترميز عدد كبير من النصوص ، هي في واقع الأمر ليست نصوصاً لغوية مقبولة ، وهذا يدفعنا الى اعتبار التركيب الأعلى للغة : الكلمة . وقد بينا في الفصل الرابع أن مثل هذا الاعتبار يخفض عدد الأرقام الثنائية اللازمة لترميز كل حرف الى ٧ اى الى حوالي ٩ أرقام ثنائية لكل كلمة .

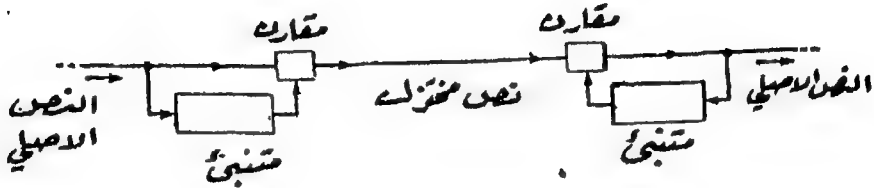
اما إذا رغبنا بمزيد من التقدم ، فعلىنا دراسة العبارات والجمل ، وهذا يصل بنا الى القواعد . ان المشكلة هنا هي حقيقة كوننا لا نملك جملة متكاملة من احكام القواعد ، وانه حتى لو امتلكننا مثل هذه الجملة فإن نظام الاتصال الذي سيستخدمها لا شك سيكون معقداً بدرجة كبيرة . لا زال من المرغوب في الحالات العملية ترميز الأحرف الانكليزية بشكل مستقل مما يستدعي استخدام ٥ أرقام ثنائية لكل حرف .

لعله من الأهمية بمكان ان نأخذ فكرة عما يمكن ان نجزه عبر ارسال النصوص اللغوية . افترض شانون ، لتحقيق هذه الغاية ، وضعية الاتصالات التالية . نفرض أننا طلبنا من شخص ما أن يحزر مستخدماً كل معرفته باللغة الانكليزية ، ماذا سيكون الحرف التالي في نص معين . اذا كان الحزر صحيحاً ، أخبرنا صاحبه بذلك ، وطلبنا منه كتابة الحرف ، أما اذا كان خاطئاً ، فإما أن نخبره بالحرف الصحيح أو نطلب منه تكرار الحزر حتى يصل الى الحل الصحيح .

نفرض الآن ان هذه العملية تجري عند المصدر ، وأن توأماً للشخص المعني يقبع عند المستقبل ، وأن هذا التوأم يطابق الشخص عند المصدر في كل شيء ، بما في ذلك الحزر الصحيح والخاطئ . وهكذا فلإرسال النص نطلب من الشخص عند المصدر أن يحزر ، وإذا كان حزره

صحيحاً ، كان حزر التوأم عند المستقبل صحيحاً أيضاً . وهكذا نحتاج لإرسال المعلومات الى التوأم عند المستقبل فقط في حالة الحزر الخاطئ للشخص عند المصدر وعندها يجب ارسال ما يكفي من المعلومات كي يتمكن الأشخاص عند المصدر وعند المستقبل من كتابة الحرف الصحيح .

رسم شانون مخططاً لنظام الاتصالات هذا موضحاً في الشكل ٧ - ١



الشكل ٧ - ١

يعمل التنبيه على النص الاصيل ، ثم يقارن الحزر مع الحرف الصحيح ، فلذا لو حفظ خطأ ما ، ارسلت بعض المعلومات . يجري التنبيه عن الحرف التالي عند المستقبل بالاستناد الى النص المعاد إنشاؤه . تجري بعد ذلك مقارنة للاشارة المستقبلية ، فلذا لم يكتشف اي خطأ ، يتم استخدام الحزر ، وإلاّ يستخدم النص المختزل لإصلاح الخطأ .

لا نملك في واقع الامر مثل هذا التوأم او اي هتنبىء فعال مماثل . وعلى الرغم من ذلك فقد تم استخدام نظام لإرسال الصور يستند أساساً على الشكل ٧ - ١ وهو في واقع الامر ذو طابع ميكانيكي صرف وإبسط من الشكل المذكور . لقد كان هدف شانون مختلفاً على كل حال، فقد اكتشف سرعة الارسال المطلوبة في هذا النظام وذلك باستخدامه شخص واحد فقط واستغنائاه عن التوأم ودراصة الأخطاء التي يرتكبها هذا الشخص عند المصدر . لقد لخص النتائج الشكل ٥ - ٤ من الفصل

الخامس . يمكن تحسين التنبؤ بالاعتماد على ١٠٠٠ حرف سابق عوضاً عن ١٠ أو ١٥ حرف . ويحتاج اصلاح الاخطاء في التنبؤات بين ٠.٦ الى ١.٣ رقم ثنائي لكل رمز . نستنتج أنه بقدر صحة هذه النتيجة فإن انثروبي النصوص الانكليزية تقع بين ٠.٦ - ١.٣ بيت لكل حرف .

يوفر المصدر المتقطع نموذجاً جيداً للبحث والمناقشة ، إلا أنه لا أهمية على الصعيد العملي . أما السبب في ذلك فهو أن المعايير الحديثة للاتصالات الكهربائية تنص على استخدام عدد قليل من الأرقام الثنائية أو نبضات القطع والواصل لإرسال النصوص الانكليزية . يجب أن نستعمل أنفسنا كي نستطيع النطق بحوالي مائة كلمة في الدقيقة ، إلا أنه أمر في منتهى السهولة أن نرسل ١٠٠٠ كلمة عبر سلك الهاتف في كل دقيقة أو ١٠ ملايين كلمة عبر قناة تلفزيونية في كل دقيقة ، ويمكن من حيث المبدأ وليس من الناحية العملية إرسال أكثر من ٥٠٠٠٠٠٠ كلمة في الدقيقة عبر القناة الهاتفية وحوالي ٥٠ مليون كلمة في الدقيقة عبر القناة التلفزيونية . لقد تخطينا في واقع الأمر عن ترميز مودس الذي يرسل بموجبه الحرف E بسرعة أكبر من الحرف Z . تستخدم الأنظمة الحديثة نفس طول الإشارة لكل حرف .

تبرز أهمية الترميز الفعل والكفو في حالة إرسال الأصوات بأكثر مما تبرز في حالة إرسال النصوص ، ذلك لأن الصوت يحتاج كمية أكبر من الأرقام الثنائية لكل كلمة بالمقارنة مع النص المكتوب ، وأكثر من ذلك فالترميز الفعال أعظم أهمية في حالة التلفزيون منه في حالة الصوت .

إن الإشارة التلفزيونية أو الصوتية هي إشارة مستمرة ، إذا ما قورنت بالنصوص اللغوية ، الأعداد ، أو الأرقام الثنائية التي هي اشارات متقطعة . وإذا استثنينا استخدام الأحرف الكبيرة والفواصل والإشارات الخاصة، تحتوي النصوص الانكليزية على الأحرف والفراغات وحسب . تتميز الموجة الصوتية أو الصوت الإنساني وفي كل لحظة بضغط معين ضمن مجال معين من الضغوط . سبق ورأينا في الفصل



الرابع أنه إذا كانت تواترات الإشارة المستمرة محدودة ضمن مجال عرضه س ، فيمكن تمثيل الإشارة بعينات أو قياسات للسمات عددها ٢ س في كل ثانية .

نتذكر على كل حال أن الانتروبي لكل رمز تتوقف على عدد القيم التي يمكن لهذا الرمز أن يأخذها ، وبما أن الإشارة المستمرة يمكنها أن تتخذ عددا لا نهاية له من القيم عند قياس عينة ما ، فإننا نندفع إلى الاستنتاج بأن انتروبي الإشارة المستمرة ستبلغ قيمة لانهاية من وحدات البيت في الثانية ولكل عينة .

تتوقف صحة هذا الاستنتاج على رغبتنا باستعادة الإشارة المستمرة مطابقة لشكلها الأصلي بصورة دقيقة . يهدف إرسال الإشارة إلى عرضها أو إسماعها ، لذا فلا تتطلب استعادتها إلا درجة معينة من التقريب ، وهكذا فقد حدد شانون وبهدف التعامل مع الإشارات المستمرة معيارا للأمانة . أن تحقيق هذا المعيار لدى استرجاع الإشارة المستمرة لا يستلزم إلا عددا محددا من الأرقام الثنائية لكل عينة أو لكل ثانية . نثبت إذن أن انتروبي المصدر المستمر لها قيمة محددة من وحدات البيت لكل عينة أو لكل ثانية ، إذا أخذنا بعين الاعتبار التقريب المقبول والمعين الذي يفرضه معيار الأمانة .

يجب أن يرتبط معيار الأمانة بالامتدادات الطويلة للإشارة وليس بالعينات فقط . وهكذا إذا ضخمنا كل عينة بمقدار ١٠٪ لدى إرسالنا الصوت فإن ما سنحصل عليه هو مجرد صوت أعلى دون المساس بنوعية وجودة الصوت . إذا أرتكبنا خطأ عشوائي مقداره ١٠٪ في كل عينة فستمتلئ الإشارة المسترجعة بالضجيج . وبشكل مماثل ، إذا اعتبرنا بث الصور وحدث خطأ متدرج عبر الصورة سواء بالللمعان أو التباين فإن هذا الخطأ سيمضي دون ملاحظة ، أما إذا لم يكن الخطأ متدرجا بل تغير من نقطة لأخرى ، فسيكون من المستحيل احتماله .

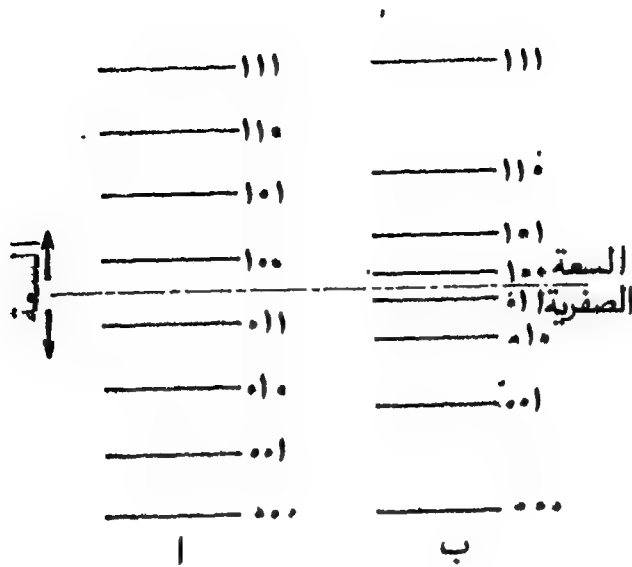
رأينا انه من الممكن ارسال اشارة مستمرة يجعل عيناتها تتخذ قيما محددة فقط ، ويبدو ان ١٢٨ قيمة تكفي لارسال الحوار الهاتفي أو الصور يجب ان نلاحظ ، ان عملية تحديد العينات في اشارات التخاطب أو الصور تعتبر في عداد العمليات الغاية في البساطة كما هي الحال في حالة ترميز الرسائل حرفا بحرف عوضا عن ترميزها كلمة بكلمة .

يمكن ان تتجاوز عملية اخذ النماذج من الاشارات المستمرة الى اعتبار اكثر من عينة في وقت واحد . ولعل هذا هو الطريق السليم للترميز الفعال والكفوء للاشارات المستمرة ، الا ان تنفيذ مثل هذا العمل هو امر صعب فعلا ، اذ ان العينات يتنم حصرها بشكل مستقل سواء في نظم تعديل رموز النبضات التي تنقل المخابرات الهاتفية من مقسم هاتفي الى مقسم آخر ومن بلدة اخرى أو في المقاسم الرقمية التي تؤمن المخابرات الابدع . كذلك تحصر العينات بشكل مستقل عند استقبال الصور الواردة من المريخ والمشتري والكواكب الابدع .

تعتبر عدة سويات أو ساعات في حالة نظم تعديل رموز النبضات ، وتربط اقرب سوية أو ساعة بكل عينة ، واذا استخدمنا كمثال ثمانية سويات فنجعل خيارنا لها بحيث تتباعد عن بعضها بمسافات متساوية كما يوضح الشكل ٧ - ٢ . يرسل النسوب الممثل للعينة ببث الرقم الثنائي المثبت على يمين النسوب .

ستطيع ان نذهب بالترميز ابعد من ذلك فنضيق المسافات بين المناسب ، فبدلا من المسافات المتساوية بينها كما في الشكل ٧ - ٢ - ١ نستطيع تضيق المسافات بين المناسب للاشارات الصغيرة وزيادتها للاشارات الكبيرة كما يوضح الشكل ٧ - ٢ - ب .

ان سبب هذا ، هو بالطبع ، ان آذاننا حساسة لاي تغير طفيف في الضغط فوق أو تحت المعدل أكثر بكثير من حساسيتها للتغيرات الكبيرة جدا بالنسبة لهذا المعدل وما يقابلها من تغيرات مقابلة موجبة أو سالبة



الشكل ٧ - ٢

في كمون الاشارة . يؤدي ضغط السعات العالية عند المصدر وتحديدًا مرة أخرى عند المستقبل الى تخفيض عدد الارقام الثنائية اللازمة لكل عينة مع الحفاظ على جودة الارسال وذلك بالمقارنة مع الحالة التي نحافظ فيها على فروقات ثابتة بين السعات ، ويسجل هذا الانخفاض ٤ ارقام ثنائية من ١١ الى ٧ .

يترتب علينا تحقيق دراسة شاملة للصوت والسمع اذا رغبتنا بارسال اكثر فعالية للتخاطب ، وجل ما يلزمنا الاقناع السامع بجودة الارسال هو تحقيق دقة معقولة في البث .

ليست الفعالية هي كل شيء . لا يستطيع مرمز الاصوات ارسال اكثر من صوت واحد في وقت واحد ، كما أن هذه المرمزات تنصرف بشكل

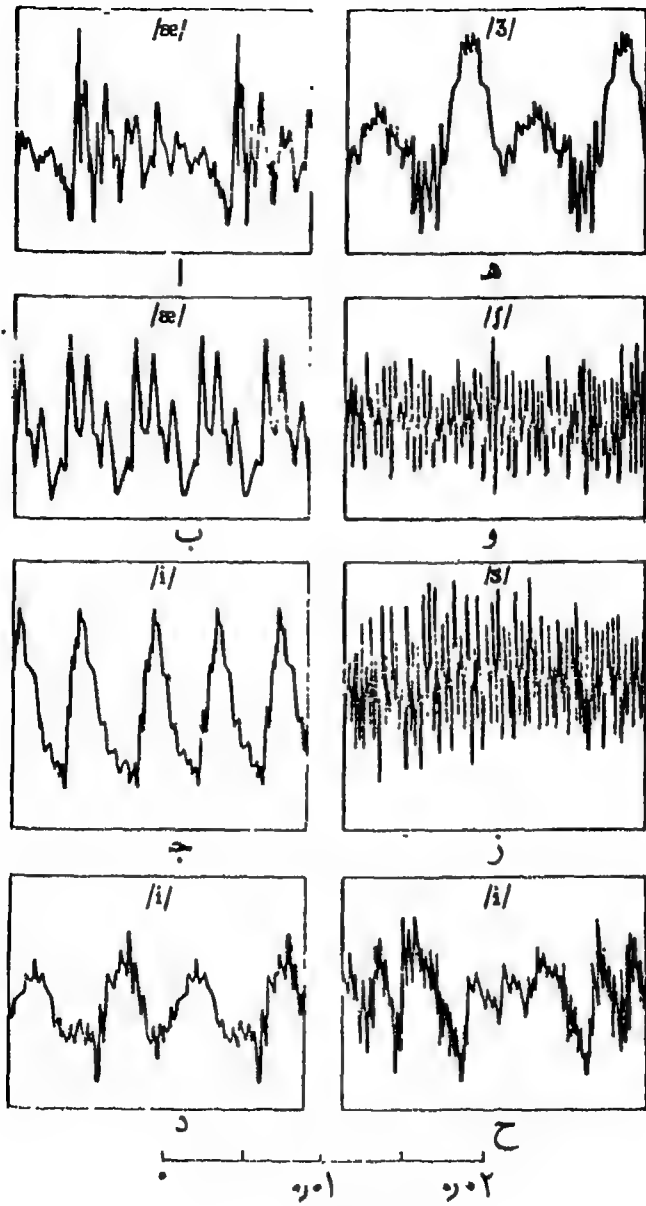
سيء اذا تكلم المرسل في جو من الضجيج . نتمكن من تجاوز هذه الصعوبات بتحقيق ارسال اكثر فعالية لموجة الصوت ، وهو ما يسمى بتحليل الموجة ، الا ان عددا من الارقام الثنائية مساو لـ ١٥٠٠٠ - ٢٠٠٠٠ رقم في كل ثانية يبقى ضروريا للتخاطب المقبول .

يوضح الشكل ٧ - ٣ اشكال مختلفة لامواج التخاطب الصوتية ، اي تغير ضغط موجة الصوت مع الزمن ، وما يقابله من تغير في الكمون الكهربائي الممثل له . نلاحظ ان بعض الاشكال الموجية تكرر نفسها بدقة ، سيما في حالة الاحرف الصوتية الانكليزية ( ا بدءا من الشكل ٧ - ٣ - ١ حتى ٧ - ٣ - د ) . او ليس من الممكن في هذه الحالة ارسال الشكل النموذجي للموجة واستخدامها من ثم خلال ادوار متكررة لاحقة . الواقع ان هذا من الصعوبة بمكان ، اذ ان الآلة لن تستطيع تحديد الدور الواقعي للحرف من خلال الكلام المنطوق ، فلقد تم تجريب هذا الامر وكن الكلام الناتج مفهوما الا انه كان مشوها بدرجة كبيرة .

ينبغي استخدام طرق اكثر عمومية اذا اردنا ترميز الكلام المنطوق بشكل فعال . يجب ان نعلم اولا عدد الاصوات المختلفة التي يجب ارسالها وما مدى تحسس اسماعنا لآراء مشكلة تمييز هذه الاصوات عن بعضها .

يتغير ضغط الهواء الممثل للاصوات بشكل سريع ، وتصل سرعة هذا التغير الى مرتبة عدة آلاف في الثانية ، بينما تمارس ارادتنا التحكم في حبالنا الصوتية ببطء بالغ ، وفي احسن الاحوال تغير نمط الانتاج الاصوات عدة عشرات من المرات في كل ثانية . لذا فالصوت يمكن ان يظهر لنا ، وهو في الواقع كذلك ، ابطأ بالمقارنة مما قد نستخلصه من دراسة التغيرات السريعة في ضغط الامواج الصوتية .

ما هو نوع التحكم الذي نمارسه على أعضاء التصويت فنيا . نتحكم اولا باصدار اصوات مسموعة بواسطة تأثيرها في حبالنا الصوتية . هذه الحبال هي عبارة عن شفتين او ثنيتين من نسيج عضلي مرتبط الى علبة



الوقت بالثواني  
الشكل ٧ - ٣

غضروفية تعرف باسم الحنجرة ، وهي ناتئة لدى الرجال وتعرف باسم تفاحة آدم . تكون الحبال الصوتية مفتوحة في حالة الصمت ، ويمكن تقريبها من بعضها بحيث أن الهواء المندفع من الرئتين يمروره بينهما سيتسبب باصدار اصوات معينة . يكون الصوت الصادر ذي تواتر عال جدا اذا كانت الحبال الصوتية جد قريبة من بعضها ، بينما ينخفض ذلك التواتر اذا ابتعدت الحبال عن بعضها .

تمتلك دفقت الهواء المارة عبر الحبال الصوتية تواترات كثيرة . يلعب الفم والشفتان دور مرنان معقد يبرز بعض التواترات اكثر من غيرها . وتتوقف هذه العملية على وضع اللسان داخل الفم ، وعلى مدى انفتاح الفتحيتين الانفييتين على الفم والرغامى وكذلك على مقدار انفتاح الفم ووضع الشفتين .

يتم النطق بالاحرف الصوتية وغيرها من الاحرف وكذلك تنوع اشكال التصويت من طريق حث الحبال الصوتية واعطاء هيئات مختلفة للجوف الفموي .

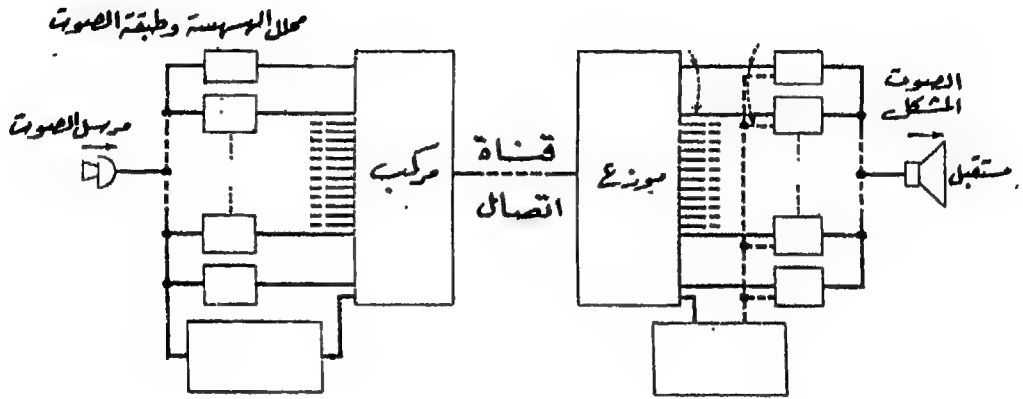
تم صياغة الاصوات الخاصة ببعض احرف اللغة الانكليزية مثل : p , b , g , t بايقاف المجرى الصوتي عند عدة نقاط بواسطة اللسان او الشفتين ، مما يخلق ضغطا هوائيا ، لا يلبث ان يطلق فجأة . تستخدم الحبال الصوتية في انتاج بعض الاصوات ، كالصوت الخاص بالحرف الانكليزي B ولا تستخدم في انتاج اصوات اخرى كالصوت الخاص بالحرف P ..

وماذا عن بعض الاحرف والتراكيب الاخرى مثل S , SH . . الواقع ان اصدار الاصوات الخاصة بها يتم عبر انقباضات مختلفة ، وتستعمل الحبال الصوتية في بعض الاحيان ، كما في الصوت الخاص بالتراكيب ZH .

ان سرع التغير للاعضاء الصوتية هي اقل بكثير من الاصوات المنتجة الا يمكن ان نستخدم هذه الحقيقة في الترميز الفعال للتخاطب .

أخترع هومر دادلي من مختبرات بيل في الثلاثينات من هذا القرن وقبل أبحاث شانون في نظرية المعلومات ، طريقة من هذا الطراز لارسال المعلومات دعاها بمرمز الاصوات . يوضح الشكل ٧ - ٤ وحدة الارسال ( المحلل ) ووحدة الاستقبال ( المركب ) من مرمرز اصوات .

٤٧٠



الشكل ٧ - ٤

ينفذ في المحلل بديل كهربائي للصوت الى ١٦ مرشحا ، يحدد كل منها شدة الاشارة الصوتية في خزام معين من التواترات ومن ثم يثبت الاشارة الى المركب الذي يعطي هذه المعلومات . يجري كذلك تحليل آخر لمعرفة الاحرف غير الصوتية من الاحرف الصوتية ، وفي حالة وجود الاحرف الصوتية يتم اكتشاف طبقتها .

اذا كانت الاحرف الصوتية غائبة ظهر هسيس عند المركب ، واذا كانت موجودة صدرت سلسلة من النبضات الكهربائية بسرعة تناسب نفثات الهواء عبر الجبال الصوتية للناطق .

يمرر الهسيس او النبضات عبر مجموعة من المرشحات ، حيث يمرر كل مرشح حزمة من التواترات مقابلة لمرشح معين في المحلل . يتم التحكم

بكمية الصوت المارة عبر مرشح معين من المركب بواسطة خرج المرشح المقابل في المحلل بحيث تكون هذه الكمية مساوية لما يشير لوجوده مرشح المحلل في الصوت وضمن ذلك المجال من التواترات .

تنتج هذه العملية الأصوات المفهومة . فما يتم هو ان المحلل يستمع الى الأصوات ويحللها ، ثم يصدر التعليمات للمركب ، والذي هو آلة ناطقة صناعية ، كي يقول كل الكلمات مرة أخرى بنفس اللهجة والطبقة الصوتية للناطق .

ان لمعظم رموزات الأصوات لهجة كهربائية قوية وغير مستحبة . لقد قادت هذه المشكلة الى افكار جديدة حول العوامل المؤثرة على طبيعة الصوت ، الا اننا لن نتابع هذا الموضوع هنا . وتبقى رموزات الصوت ، رغم ذلك مفيدة ، حتى الرموزات غير الكاملة منها . ويكون من الضروري أحياناً تشفير إرسال الأصوات . اذا اختزلنا الحديث الى ارقام ثنائية بتعديل ترميز النبضات ، يجب عندها إرسال من ٣٠٠٠٠ الى ٦٠٠٠٠ رقم ثنائي في كل ثانية ، ينخفض هذا الرقم الى ٢٤٠٠ باستخدام رموز الأصوات .

لا يمثل رموز الأصوات في الشكل ٧ - ٤ الا نموذجاً من اصناف عديدة من الاجهزة ، نطلق عليها جميعاً اسم رموزات الأصوات ، وتشارك بميزة تحليل الأصوات وإرسال اشارات تحت آلات ناطقة . يجد التحليل في الترميز الخطي المتنبئ عوامل بطيئة التغير يمكنها التنبؤ بالعينة القادمة من الحديث على أساس مجموع عينات سابقة مأخوذة بأوزان مختلفة وفق أهميتها . يمكن بث إشارة خطأ أيضاً بهدف تصحيح خرج الآلة الناطقة . يعطي الترميز الخطي المتنبئ حديثاً جيداً اذا أرسل ٩٦٠٠ رقم ثنائي في كل ثانية ، وحديثاً مفهوماً اذا أرسل ٢٤٠٠ رقم ثنائي في كل ثانية ، وأخيراً حديثاً واضحاً للغاية اذا هبط هذا الرقم الى ٦٠٠ رقم ثنائي في كل ثانية .

يمكن استنتاج عوامل أخرى للحديث من عوامل التنبؤ الخطي . يمكن استنتاج اشارات القناة المميزة لرموز أصوات القناة في الشكل ٧ - ٤



من عوامل التنبؤ الخطي . كذلك يمكن استنتاج تواترات الطنين لجهاز التصويت المميزة لأصوات مختلفة . لقد اقترح استخراج العوامل المؤثرة على جهاز التصويت وأرسالها . إذا استطعنا استخدام هذه العوامل لتمييز الأصوات المختلفة للحديث ، وأرسلنا دلائلها وحسب ، لحصلنا على ما يسمى مرمز أنواع الأصوات والذي يستطيع إرسال الحديث بنفس كفاءة وفعالية النص .

سنستعرض مرمز الأصوات بشكل سريع قبل اغلاق موضوعه .

لنلاحظ ان ارسال الأحاديث باستخدام أكثر رموزات الأصوات اقتصادية يستلزم كمية من الأرقام الثنائية لكل كلمة أكثر مما يلزم لإرسال النصوص المكتوبة . ويتعلق ذلك ، بشكل جزئي ، بالصعوبات التقنية في تحليل وترميز الأحاديث بالمقارنة مع النصوص المطبوعة ، إضافة إلى أننا في حالة إرسال الأحاديث ، نبث المعلومات كما هي الحال في حالة النصوص ، إضافة لخصوصيات الأحاديث كنوعية الأصوات وطبقته واللهجة وغيرها . بكلمة مختصرة إن انتروبي الأحاديث أكبر من انتروبي النص محسوبة لكل كلمة .

يتميز مرمز الأصوات عن غيره بقابليته ترميز الأحاديث بفعالية وكفاءة ، وسبب ذلك ان مكونات أجهزة التصويت تتغير ببطء بالمقارنة مع تقلبات الأمواج الصوتية التي تنتجها تلك الأجهزة . تعتمد فعالية رموزات الأصوات أيضاً على حدود حاسة السمع لدى الإنسان .

ان أكثر أنواع الأصوات تعقيداً هو الهيسيس كما في حالة نطق SH ( الشكل ٧ - ٣ - و ) ونطق SH ( الشكل ٧ - ٣ - ز ) ، كما ان نطق حرف S بشكل متكرر يربط شكلاً موجياً مختلفاً تماماً . ويقتضي الأمر عدداً كبيراً من الأرقام الثنائية في كل ثانية لإرسال المنطوق في كل مرة ، أما بالنسبة للأذن الانسانية ، فيبدو النطق الأول لحرف الـ S مماثلاً للنطق الثاني إذا كان له نفس محتوى التواترات بشكل عام . وهكذا لا يتوجب على مرمز الأصوات استعادة صوت الحرف S

الذي نطقه المتكلم ، بل نكتفي منه بتكرار الصوت S الذي له نفس محتوى التواترات تقريباً ، وبالتالي يكون له وقعاً متشابهاً .

يتضح اذن أن الترميز، الفعال في ارسال الاحاديث يعتمد على تحديد نماذج بسيطة وهامة واعادة تشكيلها عند المستقبل . تبرز اهمية الترميز الفعال بشكل اكبر في التلفزيون بالمقارنة مع ارسال الاحاديث ، لان القضية تتعلق هنا بقناة ارسال ذات سعة اكبر . هل يمكن تطبيق نفس المبادئ في حالة التلفزيون .

واقع الامر إن مشكلة التلفزيون اعقد بكثير من ارسال الاحاديث المنطوقة ، وسبب ذلك بشكل جزئي أن حس البصر أكثر تفصيلاً وتمييزاً من حس السمع ، ولأن التلفزيون يرسل صوراً شديدة التنوع ومن مصادر مختلفة ، بينما تتولد الاحاديث من نوع واحد من أجهزة التصويت .

وهكذا ، فلاستخدام طريقة شبيهة بمرمز الأصوات في حالة التلفزيون علينا أن نقصر ارسالنا التلفزيوني على نوع واحد من مصادر الصور ، كالوجوه الانسانية على سبيل المثال .

لنتخيل نموذجاً مطاطياً للوجه الانساني عند المستقبل . يمكننا حفظ مواصفات هذا الوجه في ذاكرة كومبيوتر ضخم . ينظر المرسل أولاً إلى الوجه الذي سيرسل ، ثم يقوم بتشكيل النموذج عند المستقبل بالشكل والهيئة . كما أن على المرسل أن يلاحظ مصادر الضوء ويكررها ذاتها بالشدة والاتجاه عند المستقبل . يتابع المصدر حركات العينين للشخص الذي يتكلم بالقرب منه ، وكذلك حركات الشفتين والفكين وخلجات العضلات الأخرى لكي يتمكن النموذج عند المستقبل من فعل الشيء المطابق . يبدو هذا التصور فعالاً للغاية وسيكون اختراعاً عظيماً إذا استطاع أحد ما تحديد طريقة تنفيذ العمليات التي أتيت على ذكرها . ولكن ما أسهل الأمنيات وما أصعب الفعل ( ينطبق ذلك على تأليف السيمفونية العاشرة لبيتهوفن ، أو تقليد لوحة كبيرة على شيء ما ، وكذلك على اختراعنا المنشود ) .

لقد أصبحت آمال الناس غير المتحققة ، في عصرنا هذا عصر التطور العلمي والتكنولوجي غير المحدود ، ذات أهمية قصوى لدرجة تم معها استخدام مصطلح خاص للتعبير عن هذه الأحلام . هذا المصطلح هو الاختراق . تستخدم هذه الكلمة أحيانا لوصف شيء غير مهم البتة وتافه ، قد تم انجزه فعلا .

إذا وضعنا جانبا أحلام المستقبل نجد أن كل نظم ارسال الصور تتبع نمودجا واحدا . يتم مسح الصورة المراد ارسالها لاكتشاف شدة الاضاءة عند مختلف نقاطها ويجري ذلك عبر سلسلة من الخطوط المتوازية والمتقاربة ، وفي حالة التلفزيون الملون تقرا ثلاثة أطيااف بالوان مختلفة في وقت واحد . تحدث عند المستقبل العملية العاكسة اذ يتم طبع النقطة الضوئية على نماذج مطابقة من الخطوط وفق شدة الاشارة القادمة والمتناسبة بدورها مع شدة اضاءة النقطة عند المصدر . تقتصر كل المحاولات التي جرت حتى الآن للترميز الفعال على طريقة المسح هذه .

يستخدم التلفزيون الملون طريقة ترميز متقدمة للغاية ، فشدة اضاءة الصورة في هذه الحالة دقيقة جداً ، بينما نمودج اللون اقل تفصيلا . وهكذا يمكن ارسال الصورة التلفزيونية الملونة المطابقة بتفاصيلها لصورة غير ملونة عبر نفس قناة الارسال لهذه الأخيرة . يستخدم التلفزيون الملون ، كما هو معروف ، اشارة تمثيلية أو تشبيهية ، اذ أن الصورة لا تختزل الى نبضات قطع ووصل منفصلة .

سيزداد بالتدريج استخدام تعديل ترميز النبضات لارسال كل انواع الاشارات بما فيها اشارات التلفزيون . سيتم مسح الصورة بالطريقة المعتادة ، الا أن شدة اضاءتها سترمز في سلسلة من الأرقام الثنائية التي تحدد شدة اضاءة عناصر متجاورة منفصلة من الصورة يسمى كل منها : بيكسيل وتقع جميعها على خط واحد . كانت هذه هي طريقة ارسال الصور من المركبات التي أمّت كوكبي المريخ والمشتري .

ان كل طرق الترميز التلفزيوني الفعال هي من النوع الرقمي . تتعامل هذه الطرق مع سلسلة من الأرقام الثنائية المثلة لاضاءة كل بيكسيل من خط معين .

تغير شدة الاضاءة في مساحات كبيرة من شاشة التلفزيون بشكل متدرج وناعم من بيكسيل لبيكسيل . يمكن ، عبر هذه المساحات ، التنبؤ عن اضاءة البيكسيل التالي ، من خلال المعلومات المتوفرة عن اضاءة كل بيكسيل سابق في نفس الخط وربما في الخط السابق . ان كل ما نلزمنا معرفته عند المستقبل هو الخطا في هذا التنبؤ ، لذا فما نقوم بإرساله هو الفرق بين شدة الاضاءة الحقيقية والشدة التي نتوقعها عند المصدر والمستقبل . سيكون التنبؤ بشكل ما سيء في المناطق المشغولة من الصورة ، لذا يصبح الفرق المرسل عندها كبيراً .

يمكننا ترميز فروق الاضاءة باكثر ما يمكن من الكفاءة والفعالية باستخدام طريقة هوفمان وبحيث تمثل الرموز القصيرة فروق شدة الاضاءة الصغيرة الأكثر تواتراً ، بينما تمثل الرموز الطويلة الفروق الأكبر والأقل تواتراً . يؤدي تنفيذ هذا المخطط الى توليد الأرقام الثنائية الممثلة لفروق شدة الاضاءة بسرعة متباينة ، اذ ستكون تلك السرعة منخفضة عند مسح المناطق المتدرجة الاضاءة من الشاشة ، وعالية في المناطق المشغولة من الشاشة . يجب ان تغذي هذه الأرقام الى منظم معلوماتي بغية ارسالها بسرعة ثابتة ، اذ يخزن هذا المنظم الأرقام الواردة اليه ثم يعيد ارسالها وفق السرعة الثابتة المساوية للسرعة الوسطية التي تتدفق وفقها المعلومات اليه . يجب استخدام منظم معلوماتي مماثل عند المستقبل .

يرتب استخدام هذا النظام في الترميز ، بهدف تحقيق ارسال تلفزيوني جيد ، تخفيض عدد الأرقام الثنائية اللازمة في كل ثانية بنسبة  $\frac{1}{2}$  الى  $\frac{1}{3}$  بالمقارنة مع عدد الأرقام الثنائية المستخدمة في حالة ترميز شدة الاضاءة عند كل بيكسيل .

يمكن تحقيق نجاح أكبر بتخزين شدة الاضاءة عند كل بيكسيل من الصورة السابقة واستخدامها من ثم في عملية التنبؤ عن شدة الاضاءة في

البيكسيل التالي المبغى ارساله ، وتظهر فعالية هذه الطريقة أكثر عندما نرسل صورة تجمع من الناس على خلفية ثابتة ، اذ لا تتغير شدة اضاءة كل بيكسيل من الخلفية لدى الانتقال من صورة لآخرى .

تستخدم بعض النماذج التجريبية الأعد حقيقة أن حركة شكل ما على خلفية معينة تتم بإيقاع اجمالي . وهكذا يمكن التنبؤ بشدة اضاءة كل بيكسيل في الشكل المتحرك من اضاءة بيكسيل آخر على بعد ثابت في الصورة السابقة .

إذا مثل كل بيكسيل من الصورة التلفزيونية بـ ٨ أرقام ثنائية ( في حالة صورة ممتازة ) ، فيمكن ارسال هذه الصورة باستخدام ١٠٠ مليون رقم ثنائي في كل ثانية . وإذا استخدمنا التطويرات في الترميز التي أشرنا إليها للتو ينخفض هذا الرقم الى ٣.٢ مليون وقد تم تخفيضه في بعض الحالات الى ٦ مليون فقط . وتدل بعض الدراسات الى إمكان تخفيضه الى رقم أدنى بحدود ١.٥ مليون في بعض الحالات الخاصة كصورة وجه على خلفية ثابتة .

هناك طريقة أخرى للإرسال الفعال للصورة التلفزيونية هي طريقة التحويل . يتم وفق هذه الطريقة تمثيل كل بيكسيل من صورة تلفزيونية أو من جزء منها كمجموع عناصر مختارة من نماذج قياسية . ويتم ارسال ساعاتها بدقات منتقاة .

نراجع ما استعرضناه حتى الآن . هناك ثلاثة مبادئ لترميز الإشارات بشكل فعال :

١ - لا نرسم الإشارة بمعدل عينة أو حرف في وقت ما ، بل نرسم ما أمكن من امتداد الإشارة .

٢ - نعتبر القيود الخاصة بمصدر الإشارة .

٣ - نأخذ بعين الاعتبار محدودية العين والأذن في تقضي الأخطاء عند إعادة تشكيل الإشارة .

يتضمن مرمز الأصوات هذه المبادئ بشكل جيد . لا يتم تفحص الشكل الآتي لوجه الصوت بكل تفاصيلها . يرسل بدلا عن ذلك توصيف للشدات المتوسطة عبر مجال معين مرسل من التواترات ، إلى جانب إشارة أخرى تبين الأحرف الصوتية ، وطبقة الصوت لها . يعد هذا الترميز فعالا بما فيه الكفاية لأن أعضاء التصويت لا تغير أماكنها بسرعة أثناء توليد الأصوات . يولد مرمز الأصوات عند المصدر إشارة صوتية لا تشابه في تفاصيلها الإشارة الأصلية ولكنها تشبهها بشكل عام ، وذلك بسبب القصور الطبيعي لحس السمع لدينا .

يمثل مرمز الأصوات نموذجا مثاليا لأجهزة الإرسال الفعال . يأتي بعده ربما التلفزيون الملون حيث تعرف تغيرات الألوان عبر الصورة بحدة أقل من تغير الشدات . يعتمد ذلك على قصور العين عن مشاهدة التفاصيل في الصورة الملونة .

يجب على فن الاتصالات المعاصر ، بعيد ذلك ، أن يستخدم وسائل تعتبر وفق نظرية الاتصالات غير فعالة بما فيه الكفاية ، ذلك لأنها لا ترمز امتدادات طويلة من الإشارة في وقت ما .

ويبقى الترميز الفعال هاما للغاية ، ويتجسد ذلك بشكل خاص في حالة إرسال الإشارات ذات الحزم العريضة نسبيا ( تلفزيون أو إشارات صوتية ) عبر الدارات الباهظة التكاليف ككابلات الهاتف عبر المحيط .

لا شك أن المستقبل سيشهد طرقا أكثر فعالية في الترميز وستتحقق نتائج باهرة ، إلا أن علينا الحذر في المضي بعيدا أكثر مما ينبغي .

لنتخيل مثلا أننا نرسل نصا إنكليزيا حرفا بحرف . إذا ارتكبنا بعض الأخطاء في إرسال عدد من الأحرف ، نستطيع رغم ذلك استرجاعها من النص :

Here I have replaced a few vowels by o.

يمكننا استبدال الأحرف الصوتية بحرف x والحصول على :

Hxrx x hxvx rxplxcd thx vxwxls bx x.

إذا رمزنا النصوص اللغوية كلمة بكلمة يكون الترميز أكثر فعالية ، وإذا ارتكبنا خطأ في هذه الحالة أثناء الإرسال ، لا نكون في واقع الأمر قد حصلنا على كلمة مهجأة بشكل خاطئ وكل ما في الأمر أن كلمة قد حلت محل أخرى . يمكن أن يترتب على ذلك بعض التعقيد ، مثلاً استبدال جملة مثل : هطل الثلج في الشتاء ؛ بجملة أخرى هي : هطل الثلج في الصيف .

طبعاً يمكن أن نكتشف الخطأ بملاحظتنا أن الكلمة غير مناسبة . ولكن لنفرض أننا استخدمنا ترميزاً مغايراً لا يمكنه إلا استرجاع التراكيب الإمراكية وحسب ، عندها ستكون فرصتنا قليلة للغاية في اكتشاف أي خطأ في الإرسال .

تتصف النصوص اللغوية ومعظم مصادر المعلومات الأخرى بالفزارة ، إذ إنها تقدم بدائل متعددة للمستقبل . إذا وقعت بعض الأخطاء الناجمة عن استبدال أحرف بأخرى ، فلا يعني ذلك أن الرسالة قد دمرت ، إذ نستطيع استنتاج الأحرف غير الصحيحة من الأحرف التي تم إرسالها بشكل صحيح . ولعله هذا هو السبب ، أي الفزارة ، في أن كلا منا يستطيع قراءة ما كتبه الآخر بيده . عندما ترسل إشارة مستمرة وفق عينات عند لحظات زمنية معينة تتسبب الأخطاء في سمات الإشارات بعض القرقعة في الصوت المرسل أو بعض البقع في الصورة المبتوثة .

لقد كان هدفنا الأول حتى الآن هو إزالة هذه الفزارة ، بحيث نتمكن من إرسال أقل عدد ممكن من المؤشرات الهامة التي يمكن بواسطتها استعادة الرسالة . ولكننا نستنتج استناداً ما قدمناه ، أن النجاح الكامل في تحقيق هذا الهدف سيعرض الرسالة المبتوثة لخطر الضياع ، إذ

أن أي خطأ في الإرسال سیرتب وصول رسالة خاطئة برمتها وليست مشوهة وحسب . أما إذا فشلنا في تحقيق هدفنا المثالي بمقدار ضئيل ، فإن خطأ الإرسال سیتترك آثاراً كبيرة جداً على الرسالة المبثوثة دون تدميرها .

نعلم جميعاً أن هناك القليل من الضجيج في الإرسال الكهربائي ، ويتمثل بهسیس في الراديو وبقع ثلجية في التلفزيون ، وعینا أن نضيف إلى معلوماتنا أن مثل هذه الظاهرة هي من أصل الطبيعة ولا يمكن التخلص منها بشكل نهائي . هل يمكن لذلك أن یفسد خطتنا من حیث الأساس ، تلك الخطأ الهادفة لترميز الرسائل التي یولدها مصدر للإشارات في عدد من الأرقام الثنائية أكبر بقليل من انتروبي المصدر .

سنتناول هذا الموضوع في الفصل القادم .





## الفصل الثامن

### القناة ذراع الضجيج

من الصعب ان يضع احدنا نفسه مكان آخر ، وعلى الاخص ان يضع نفسه مكان من عاش في ازمان غابرة . ماذا يمكن أن يكون شأن شخص من العصر الفيكتوري مع الازياء المعاصرة ، وهل كانت قوانين نيوتن في الحركة والثقالة مذهشة لمعاصريه كما كانت نظرية اينشتين مذهلة بدورها بالنسبة لمعاصري اينشتين . ما هو الشيء المحير في النسبية . ان الطلبة المعاصرين يتقبلونها دون تعليق وبشيء من الحتمية ، كما لو ان افكارا اخرى هي الغريبة والمدهشة والتي لا يمكن تفسيرها .

إن سبب ذلك ، بشكل جزئي ، هو ان موافقنا وليدة محيطنا وعصرنا ، ولأنه ، في حالة العلم على الاقل ، تأتي الافكار المحدثه كاستجابة لاسئلة مستجدة او مصاغة بشكل اكثر دقة . نتذكر انه وفق افلاطون ، استطاع ارسطو استجرا برهان هندسي من احد اتباعه ببساطة عن طريق طرح بعض الاسئلة العبقريه . لا يحتمل أن يتوصل الى إجابة مناسبة مهما كانت ، اي من الذين لم يطرحوا على انفسهم اسئلة معينة ، وعندما يصاغ السؤال من خلال الإجابة الكامنة في الدماغ ، يبدو الجواب في منتهى الوضوح .

لقد تنبه العاملون في الاتصالات منذ البداية الى حقيقة ان الدارات او الاقنية ليست كاملة . نحن نستمع في الهاتف أو الراديو الى الإشارة المطلوبة على خلفية من الضجيج ، سواء اكان عاليا أو خافتا ، والذي

يختلف من قرعة الكهرباء الساكنة الى الهيسيس المستمر ، أما في التلفزيون فتبدو الصورة متوضعة على خلفية من البقع الثلجية الخفيفة أو القوية . كذلك يختلف الحرف المستقبل عن الحرف المرسل في البث البرقي .

نفرض أن أحدها قد سأل مهندساً للاتصالات عام ١٩٤٥ من ضوء الضجيج ، ولربما صاغ السؤال في الجملة التالية : ما الذي يمكن فعله انزاء الضجيج ، من المحتمل أن جواب المهندس كان سيأتي على النحو : زد من استطاعة المصدر أو اجعل المستقبل أقل ضجيجاً ، وتأكد من أن المستقبل سيكون أقل حساسية لتغيرات التواترات الغير متضمنة في الإشارة .

عندها يمكن ان يكون السائل قد عاد للالاحاح : إلا يمكن أن نفعل أي شيء آخر ، ولا يتوانى مهندس عام ١٩٤٥ عن الاجابة السريعة بقوله : استخدام تعديل التواترات الذي يطال حزاما اعرض ، وبهذا تقلل من اثر الضجيج ..

لنفرض ان الجدل قد استطرد ، وان السائل طرح السؤال التالي : يمكن ان يترتب على الضجيج ، لدى بث رسالة من لوحة أزرار ، وصول بعض الاحرف الى المستقبل بشكل خاطيء ، كيفه يمكن ان نتحاشى ذلك من الممكن أن تكون اجابة مهندسنا مصافحة على النحو التالي : اعرف انني اذا استخدمت خمسة نبضات قطع او وصل لتمثيل رقم ثنائي، واصطلحت ان التركيب المكون من ثلاثة نبضات قطع ونبضتي وصل هو الذي يمثل الرقم الثنائي ، لا يمكنني في بعض الحالات تحديد الخطأ مثلاً عندما تحتوي الإشارة المستقبلية على عدد من نبضات الوصل اقل أو اكبر من اثنين .

من الممكن ان سائلنا قد تابع الموضوع الى حد أبعد بعرضه المشكلة الآتية : نفرض ان دارات لوحة الأزرار تسبب الأخطاء ، هل هناك من طريقة لا يصال الرسالة الى هدفها . اما رد المهندس ، فكان على الأرجح : أعد البث عدة مرات ، إلا أن هذا مضيعة للجهد . اصلح الدارات المعطوبة

نقترب هنا شيئاً فشيئاً من الاسئلة التي لم تطرح قبل شانون .  
الا اننا قبل التعرض لها سنتابع سيناريو حوارنا الافتراضي بأن نعطي  
للسائل دور الكلام بسؤاله : افرض انني اخبرتك بخصوص ترميزي  
الجيد لرسالتي وانني ارسلتها عبر قناة ذات ضجيج بنسبة مهمة  
تماماً من الاخطاء ، وكانت نسبة اقل من اي قيمة محددة . وافرض  
اكثر من ذلك انني اخبرتك أن معرفتي بنوعية وشدة الضجيج في الدارة  
مكنتني من حساب عدد الاحرف الممكن ارسالها عبر القناة في كل  
ثانية وان ارسال عدد من الاحرف عبر الدارة اقل من العدد المحسوب  
سيتم افتراضياً دون خطأ ، بينما اذا زاد عدد الاحرف المرسل عن  
العدد المحسوب ، أصبح الوقوع في الخطأ محتملاً .

يستمر السيناريو باجابة مهندس عام ١٩٤٥ : الافضل ان تريني  
ما تفعل . لم افكر بهذه الطريقة من قبل ، واعتقد على كل حال ان ما تقوله  
غير محتمل عموماً ، اذ أن ازدياد الضجيج يفضي الى ازدياد الخطأ ،  
كما ان اعادة البت عدة مرات سيحسن الوضع في حالة عدم وجود كمية  
كبيرة من الاخطاء . ولكن يبقى كل هذا مكلفاً للغاية هل من الممكن أن  
ينطوي كلامك على مغزى ما ، اذا تحقق وجود ذلك المغزى فساصبح في  
حيرة من امري . يا لطريقة عرضك هذه .

ومهما ذهبنا في السيناريو ابعد من ذلك فلن نجد الا مزيداً من اخطاء  
المهندس الذي ضلته طريقة التناول السابقة . وما نود تشييته هنا ان  
المهندسين والرياضيين الذين عاصروا الفترة الانتقالية يشتركون جميعاً  
بمشاعر واحدة ازاء اعمال شانون في حقل ارسال المعلومات عبر قناة ذات  
ضجيج . انها مشاعر الدهشة والاعجاب . الا انني اعرف رجلاً غير  
متخصص لم يجد في تلك الاعمال ما يدهش ، فما عساني فلعل ازاء مثل  
هذا الموقف .

ربما أن أحسن طريقة لتناول الموضوع هي تلك التي تعرض لمشكلة  
القناة ذات الضجيج كما نفهمها اليوم . ومهما كان من رفع الاسئلة  
واجابتها ومهما بدا الحوار طبعياً ومفروضاً ، فالقضية برمتها تنتمي

لمرحلة ما بعد شانون وإن كان على القارئ أن يتعجب أو لا يتعجب فهذا هو شأنه وله الخيار في ذلك .

لقد قدمنا حتى الآن عرضاً للأساليب البسيطة والصعبة على حد سواء والهادفة لترميز النصوص والاعداد لتحقيق ارسال الفعال والكفؤ وراينا كيف يمكن تمثيل اشارة كهربائية عرض حزامها س بعينات أو ساعات عددها ٢ س في الثانية مأخوذة في لحظات تفصل بينها فترات زمنية بطول  $\frac{1}{2}$  ثانية . كما سبق واستنتجنا ان استخدام تعديل ترميز النبضات ،

يفضي الى توظيف حوالي ٧ ارقام ثنائية لتمثيل سعة كل عينة . وهكذا فبالجوء الى تعديل ترميز النبضات أو أي منهج آخر معقد وفعال ، نستطيع بث اشارات الاصوات أو الصور عبر سلسلة من الارقام الثنائية أو نبضات القطع والوصل ، أو النبضات الكهربائية السالبة والموجبة .

تؤكد صحة كل ما تقدم اذا استلم المستقبل نفس الاشارة التي صدرت عن المرسل ، الا ان الواقع العملي يختلف عن ذلك ، فالمستقبل قد يستلم في بعض الاحيان . اذا كانت الاشارة الصادرة ١ ، واذا كانت الاشارة الصادرة . يمكن ان ينجم ذلك عن أعطال القواطع الكهربائية في الدارات السريعة . كذلك قد يحصل الخطأ بسبب تداخل الاشارة والضجيج ، سواء اكان ضجيجاً من جهاز مصنوع أو من العواصف المغناطيسية .

نستطيع أن نبين من خلال حالة بسيطة كيف تحدث الأخطاء بسبب تداخل الاشارة والضجيج . لننتصور اننا نرغب بارسال عدد كبير من الارقام الثنائية . أو ١ في كل ثانية عبر سلك باستخدام اشارات كهربائية يمكننا تمثيل الاشارة الناقلة لهذه الارقام بمتتالية من العينات ع كما في الشكل ٨ - ١ ، حيث تكون كل عينة اما ١ + أو ١ - يتوفر لنا هنا سلسلة من الكمونات السالبة والموجبة الممثلة للارقام الثنائية .

١٠ ١١١ ٠٠ ١٠

إذا فرنا الإشارة الموجبة المستقبلية والمكونة من الإشارة الأصلية والضجيج على أنها ١ ، بينما فرنا السالبة على أنها ٠ . فإن الرسالة المستقبلية الكلية ستكون من ر رقم ثنائي حسب ما يبدو في الشكل ٨ - ١ وستنحصر أخطاء الإرسال في المواقع : ٢ ، ٣ ، ٧ .

- 190 -

المبسطة بقرعة وهسيس وبقع ثلجية ، أما اذا كان ترميز التراكب هو المتبنى فيكون تأثير الاخطاء اكثر فداحة ، الا ان علينا ان نتوقع بشكل عام ان اخطر الاخطاء يقع في حالة ارسال النصوص ..

يتجسد وقوع الأخطاء عند إرسال النصوص بالطرق التقليدية ،  
 ورود أحرف غير صحيحة هنا وهناك . يتميز النص بفزارته مما يسمح  
 لنا بكشف الخطايا بالعين المجردة إلا أن هذه الأخطاء تصبح باهظة  
 التكاليف في بعض الحالات مثل طبع نسخ الصحف بشكل متواقت في  
 أماكن متباعدة باستخدام الإشارات الكهربائية .

تصبح الاخطاء خطرة في حالة ارسال الاعداد ، مثلا ان يتبدل العدد  
الذال على مبلغ من المال من ١٠٠٠ الى ٩٠٠٠ ، أو أن تتغير بعض المقاطع  
من برنامج كومبيوتر او المعلومات المغداة اليه ، تصبح اذ ذاك كل نتائج  
الكومبيوتر لا معنى لها .

ذهبنا في دراستنا أبعد من ذلك عندما بينا ان زيادة الفعالية في ترميز النصوص اللغوية أو غيرها بهدف تقليل الغزارة ، سيؤدي الى زيادة الحساسية للأخطاء ، وبذا سيجري تغير عميق في معنى الإشارة المستقلة .

وإذا كانت الأخطاء بهذه الأهمية بالنسبة لنا ، فكيف لنا أن نتحاشاها  
تستند إحدى الطرق على تكرار الإرسال كان نرسل كل حرف أو كل  
رقم ثنائي ممثل مرتين ، وهكذا فالإرسال بالسلسلة الثنائية ١.٠.١.٠.١  
نكرر العمل مرتين ونحصل على :

X  
خطا

. ۱ . . ۱ ۱ . . . . ۱ ۱ ۱ ۱ . . . ۱ ۱	مرسل
۱ ۱ . . ۱ ۱ . . . . ۱ ۱ ۱ ۱ . . . ۱ ۱	مستقبل

يؤدي هذا الأسلوب الى تخفيض سرعة ارسال حتى نصف قيمتها ،  
اذ يتوجب علينا على الدوام التوقف وارسال كل رقم مرة ثانية . الا  
اننا نستطيع ان نرى من خلال الاشارة المستقبلية الخطأ الواقع عند  
النقطة المشار اليها ، فعوضاً عن وصول اشارتين متماثلتين .. او ١١ ،  
نحصل على زوج غير متماثل : ٠١ ، ولكننا لا نستطيع تحديد الاشارة  
الصحيحة الصادرة .. او ١١ لقد اكتشفنا الخطأ ولم نستطيع تصحيحه .

اذا لم تكن الاخطاء متواترة ، أي اذا كان احتمال وقوع خطأين  
عند ارسال ثلاثة ارقام متتالية مهملًا ، يمكننا كشفه وتصحيح الخطأ  
بارسال كل رقم ثلاث مرات ، حسب المثال التالي :

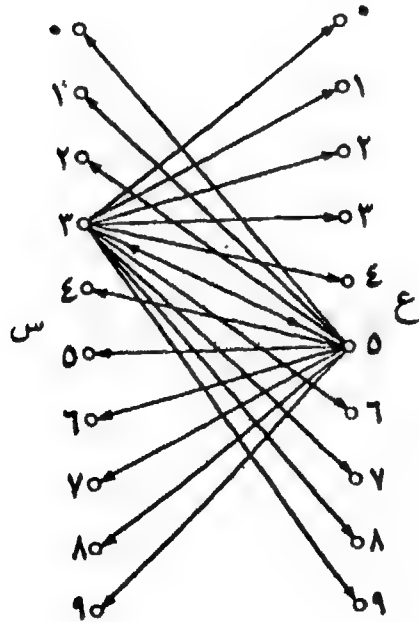
مرسل	١	١	١	٠	٠	٠	١	١	١	٠	٠	٠	٠	٠	٠	٠
مستقبل	١	١	١	٠	٠	٠	١	٠	١	٠	٠	٠	٠	٠	٠	٠
								↑								
								خطأ								

لقد خفضنا سرعة ارسال حتى الآن الى الثلث ، لاننا سنتوقف عند  
كل ارسال مرتين بهدف تكرار ارسال الحرف ثلاثة مرات ، الا اننا  
نستطيع تصحيح الخطأ استنادا لحقيقة ان الارقام في الزمرة الثلاثية  
١٠١ ليست متشابهة . فاذا فرضنا ان هناك خطأ واحدا في ارسال ارقام  
هذه الزمرة ، لوجب ان تكون هذه الزمرة على الشكل ١١١ ، ممثلة لـ  
١ وليست ١٠٠ ، ممثلة لـ ٠ .

نجد هنا ان طريقة تكرار ارسال الارقام كفيلة بكشف وتصحيح  
الاططاء القليلة الحدوث اثناء الارسال ، ولكن ما هي تكاليف هذه  
الطريقة ؟ اذا استخدمناها لكشف وتصحيح الاخطاء فستنخفض سرعة  
الارسال الى النصف اذا كررنا ارسال مرتين الى الثلث اذا كررناه  
ثلاثة مرات ، كما ان هذه الطريقة تصبح عديمة الجدوى اذا كانت  
الاططاء متواترة لدرجة وقوع اكثر من خطأ واحد عند ارسال رقمين او  
ثلاثة .

من الواضح ان هذه الطريقة لن تقود اطلاقا الى فهم صحيح لامكانية تصحيح الاخطاء . ان ما يلزمنا في هذا المجال اداة رياضية عميقة وفعالة لقد استطاع شانون الحصول على هذه الاداة من خلال اكتشافه وبرهانه لنظريته الاساسية عن القناة ذات الضجيج . وسنتبع فيما يلي اسلوب معالجته للموضوع .

سنعتبر حالة جملة اتصالات متقطعة حيث يتم ارسال زمرة من الاحرف او الارقام العشرية من . حتى ٩ ، وذلك بهدف الحصول على نموذج مجرد وعام للضجيج والاختفاء . ولتبسيط الامر نعتبر مصدر ارسال يبث الارقام العشرية فقط ، وهذا ما يوضحه الشكل ٨ - ٢ .



الشكل ٨ - ٢



نجد على اليسار دوائر ربط بكل منها دليل رقمي ، نعتبر هذه الدوائر بمثابة مفاتيح ، وعلى اليمين يتوضع نظام مشابه ، نعتبر عناصره بمثابة أضواء . وهكذا عندما نضغط زر على اليسار يث أحد الأضواء على اليمين نوره .

إذا كان نظام إرسالنا هذا خاليا من الضجيج ، فسيؤدي ضغط المفتاح إلى اضاءة الضوء . وضغط المفتاح ١ إلى اضاءة الضوء ١ وهكذا أما في حالة نظام إرسال غير كامل حيث يسود الضجيج فإن ضغط المفتاح قد يؤدي لاشعال الضوء . مثلا أو الضوء ١ أو لضوء ٢ أو أي ضوء آخر كما توضح الاسهم المنبعثة من المفتاح ٤ في الشكل ٨ - ٢ . نصلح انه في حالة نظام الاتصال ذي الضجيج ، يكون اشعال أحد الأضواء بسبب ضغط مفتاح معين هو قضية احتمالية محضة مستقلة عما جرى قبلها وأننا إذا ضغطنا المفتاح ٤ فسيكون هناك احتمال مقداره ح ( ٦ ) بأن الضوء ٦ هو الذي سيضيء .

إذا لم يكن المرسل واثقا من الضوء الذي سينير عند ضغطه مفتاح معين ، فإن المستقبل بدوره لن يستطيع تحديد المفتاح الذي ضغط عند مشاهدته النور من ضوء معين ، وهذا ما توضحه الاسهم المنطلقة من الضوء ٦ نحو مختلف المفاتيح على اليسار . إذا كان النور صادرا من الضوء ٦ ، فهناك احتمال مقدار ح ( ٤ ) بأن يكون المفتاح ٤ هو المفتاح الذي ضغط وهكذا تتحقق في حالة نظام خال من الضجيج العلاقات :

$$\begin{aligned} \text{ح ( ٦ )} &= 1 \quad \text{و} \quad \text{ح ( ٤ )} = \text{ح ( ٦ )} = \text{ح ( ٩ )} = 0.0000101010 \\ &\dots \text{الخ} . \end{aligned}$$

سيزيد تعقيد الشكل ٨ - ٢ لو رسمنا كل الاسهم الممكنة وكذا سيزداد عدد الاحتمالات المدرجة ، ولكنني أعتقد أن درجة وطبيعة الرتبة لدى المستقبل عند محاولة المرسل بث حرف معين قد توضحا بما فيه الكفاية ، وكذلك درجة وطبيعة الرتبة لدى المرسل عند تلقي المستقبل

لحرف معين . دعونا الآن نتناول موضوع قناة الاتصال ذات الضجيج بشكل أكثر شمولاً . لتحقيق هذا الهدف نستخدم الحرف س لتمثيل الأحرف المرسل والحرف ع لتمثيل المستقبل .

تشكل الأحرف س المجموعة المولدة عن مصدر الإرسال . إذا كان عدد هذه الأحرف هو  $M$  وكان احتمال ورود كل منها مستقلاً عما سواه ومساوياً  $\frac{1}{M}$  ، تكون سرعة توليد المصدر للمعلومت أي الانتروبي الخاصة به كما تعلمنا سابقاً .

$$H(S) = \sum_{E=1}^M -\frac{1}{M} \log_2 \left( \frac{1}{M} \right)$$

نعتبر خرج الجهاز ، والذي نستخدمه بالحرف ع ، على أنه مصدر رسائل آخر . لا يساوي عدد الأضواء عدد المفاتيح بصورة عامة ، إلا أننا سنفترض ذلك ، وهكذا سيكون هناك  $M$  ضوء ، وبداً تساوي انتروبي الخرج :

$$H(E) = \sum_{E=1}^M -\frac{1}{M} \log_2 \left( \frac{1}{M} \right)$$

لنلاحظ أنه بينما يعتمد  $H(S)$  على دخل قناة الاتصال فقط ، يتوقف  $H(E)$  على نفس الدخل وعلى أخطاء الإرسال إضافة لذلك ، وهكذا فاحتمال إنارة الضوء  $\frac{1}{M}$  في حالة قصر الإرسال على ضغط المفتاح  $\frac{1}{M}$  فقط يختلف عن احتمال إنارة الضوء  $\frac{1}{M}$  في حال ضغط المفاتيح بشكل عشوائي .

إذا افترضنا أن بإمكاننا مراقبة المرسل والمستقبل معاً ، لاستطعنا اكتشاف تواتر تركيب معين من س ، ع ، مثلاً كم مرة أدى إرسال  $\frac{1}{M}$  إلى استقبال  $\frac{1}{M}$  ، أو إذا عرفنا الخصائص الإحصائية للمصدر والمستقبل لتمكننا من حساب هذه الاحتمالات ومنها نستطيع حساب انتروبي أخرى :

$$ت (س ، ع) = \sum_{س=1}^2 \sum_{ع=1}^2 - ح (س ، ع) \times ل (ح (س ، ع) )$$

وهي تمثل الرتبة في اقتران زوج معين س ، ع .

نذهب الآن أبعد من ذلك ؛ فنفرض أننا نعرف س ، أي أننا نعرف أي المفاتيح تم ضغطه ، ما هو احتمال اضاءة مختلف الاضواء في هذه الحالة ، كما يتوضح بالاسهم على يمين الشكل ٨ - ٢ . يقود ذلك الى الانتروبي التالية :

$$ت (ع) = \sum_{س=1}^2 - ح (س) \times ل (ح (س) ) \times ل (ع | س)$$

وهي انتروبي شرطية للرتبة ، وبذكر شكلها بانتروبي الآلة المتناهية الحالات ، وكما في تلك الآلة ، نضرب الرتبة لحالة معينة ( الحالة هنا قيمة س ) باحتمال ان تلك الآلة ستحقق ثم نجمع عبر كل الحالات الممكنة.

نفرض اخيرا أننا نعرف أي الاضواء سيشتع . نستطيع تحديد احتمالات ضغط مختلف المفاتيح ، وهذا بدوره يقود الى انتروبي شرطية اخرى :

$$ت (س) = \sum_{ع=1}^2 \sum_{س=1}^2 - ح (ع) \times ل (ح (ع) ) \times ل (س | ع)$$

وهي عبارة عن المجموع لكل قيم ع لاحتمال استقبال ع مضروباً في الرتبة المقابلة لاحتمال ضغط المفتاح س عند تلقي الضوء ع .

تعتمد كل حسابات الانتروبي هي على الخصائص الاحصائية للمصدر لانها تتوقف على تواتر ارسال أو تواتر استقبال ع ، كذلك على اخطأ الارسل .

ان افضل تفسير لكميات الانثروبي المحسوبة اعلاه هو ذلك الذي يعتبرها ممثلة للريبة المرتبطة بتوليد الاحرف عند المصدر وتلقيها عند المستقبل ، وهكذا نثبت ما يلي :

ت ( س ) : الريبة بالنسبة ل س ، بمعنى اي الاحرف سيتم ارساله .

ت ( ع ) : الريبة المتعلقة بالحرف الذي سيتم استقباله في حالة اعتبار مصدر رسائل معين وقناة ارسال محددة .

ت ( س ، ع ) : الريبة في حالة ارسال س ، واستقبال ع .  
ت ( ع ) : الريبة في استقبال ع عند ارسال س ، وهي متوسط الريبة بالنسبة للمرسل فيما يتعلق بالحرف الذي سيتم استقباله .

ت ( س ، ع ) : الريبة في ارسال س عند استقبال ع ، وهي متوسط الريبة بالنسبة للمستقبل فيما يتعلق بالحرف الذي ارسل .

ترتبط هذه الكميات فيما بينها ببعض العلاقات :

$$ت ( س ، ع ) = ت ( س ) + ت ( ع )$$

اي ان الريبة في حالة ارسال س واستقبال ع تساوي مجموع الريبة في س والريبة في استقبال ع عند ارسال س .

$$ت ( س ، ع ) = ت ( ع ) + ت ( س )$$

اي ان الريبة في حالة ارسال واستقبال ع تساوي مجموع الريبة في ع والريبة في ارسال س عند استقبال ع .

نلاحظ أنه إذا ساوت  $t$  (ع) للصفر فإن  $t$  (س) ستساوي  
 $t$  (س) الصفر في نفس الوقت وإذا ذلك تساوى  $t$  (س) مع  $t$  (ع) ، وهذه  
هي حالة القناة بدون ضجيج حيث تساوى انتروبي الإشارة الصادرة  
مع انتروبي الإشارة المستقبلية ، ويعرف المرسل أي الأحرف سيصل ،  
وكذا المستقبل يعرف أي الأحرف أرسل .

تبدو الريبة  $t$  (س) أي الريبة في الحرف المرسل عند استقبال  
 $t$  (ع) حرف معين ، كمقياس طبيعي للمعلومات المفقودة عبر الإرسال . هذا  
هو الواقع فعلاً ، لذا أعطيت هذه الانتروبي تسمية خاصة : الالتباس في  
قناة الاتصال . إذا اعتبرنا كل من  $t$  (س) ،  $t$  (ع) كانتروبي مقدرة  
بالبيت في الثانية ، يمكننا أن نبرهن أن سرعة إرسال المعلومات عبر  
القناة هي :

$$\text{سر} = t \text{ (س)} - t \text{ (ع) (س)}$$

وهكذا تساوي هذه السرعة سرعة بث المعلومات من المصدر مطروحاً  
منها الالتباس في القناة ، أي انتروبي المصدر مطروحاً منها ريبة المستقبل  
فيما يتعلق بالحرف المرسل .

تساوي هذه السرعة أيضاً :

$$\text{سر} = t \text{ (ع)} - t \text{ (س) (ع)}$$

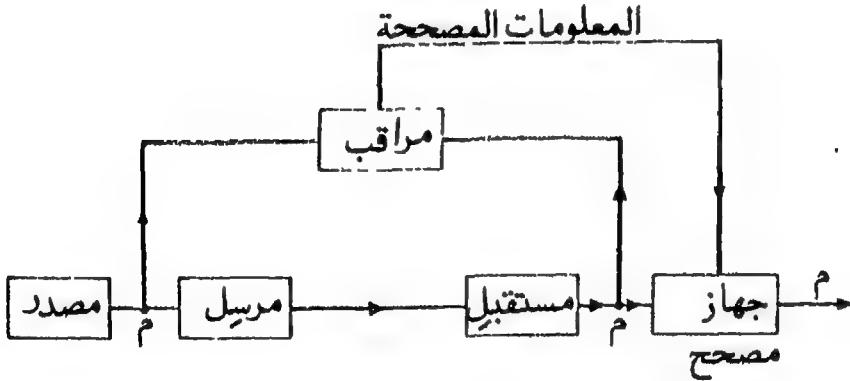
بكلمة أوضح ، حاصل طرح ريبة المرسل فيما يتعلق بالحرف الواصل  
من انتروبي المستقبل .

وأخيراً تعطى هذه السرعة بالعلاقة :

$$\text{سر} = t \text{ (س)} + t \text{ (ع) (ع)} - t \text{ (س) (ع)}$$

اي مجموع انتروبي المصدر وانتروبي المستقبل مطروحاً منه الريبة  
في ارسال س واستقبال ع . نلاحظ انه من أجل قناة خالية من الضجيج  
يكون  $H(S, E)$  مساوياً للصفر الا في حالة  $S = E$  وبالتالي :  
 $H(S, E) = H(S) = H(E)$  وتكون سرعة ارسال المعلومات هي  
نفسها انتروبي المصدر  $H(S)$  .

يوضح شانون معنى هذه السرعة بالشكل ٨ - ٣ . نفرض هنا مراقباً  
يلاحظ الاشارة المرسل والمستقبلية ويقارن بينها ثم يرسل التصحيح  
المطلوب للاشارة المستقبلية . يبرهن شانون ان تصحيح الاشارة يستلزم  
تساوي انتروبي الاشارة المصححة مع الالتباس في القناة .



الشكل ٨ - ٣

نلاحظ ان سرعة ارسال المعلومات  $H(S)$  تعتمد على القناة وعلى  
المصدر . كيف نستطيع توصيف السعة الخاصة بارسال المعلومات في  
حالة قناة غير كاملة او ذات ضجيج . نستطيع اختيار المصدر بحيث  
تكون السرعة  $H(S)$  ما اكبر ما يمكن لقناة ارسال معينة . تدعى هذه القيمة  
العظمى بسعة القناة ، ونرمز لها برمز مناسب هو  $C$  .

تتضمن نظرية شانون للقناة ذات الضجيج السعة  $S$  ، وتنص على :  
نفرض مصدراً متقطعاً ذي انتروبي  $T$  وقناة إرسال متقطع سعتها  $S$  .  
إذا كانت  $T > S$  ، نستطيع إيجاد نظام ترميز بحيث يمكن إرسال  
خرج المصدر عبر القناة بتواتر صغير جداً من الأخطاء أي بالالتباس  
صغير ، أما إذا كانت  $T < S$  فيمكن عندها ترميز المصدر بحيث يكون  
الالتباس القناة أقل  $T - S$  ، حيث  $L$  عدد صغير جداً . لا توجد  
أي طريقة للترميز يمكنها جعل الالتباس القناة أقل من  $T - S$  .

هذه هي الصيغة التي أدهشت الرياضيين والمهندسين . كلما ازدادت  
احتمالات الأخطاء في الإرسال ، أي كلما تواترت الأخطاء ، انخفضت ، وفق  
شانون ، سعة القناة بشكل مطرد . مثلاً إذا اعتبرنا نظاماً مرسلًا للأرقام  
الثنائية وكان بعضها خاطئاً ، فإن سعة القناة  $S$  ، أي عدد وحدات  
البيت من المعلومات المقابلة لكل رقم ثنائي مرسل ، سيتناقص . إلا أن  
سعة القناة تنناقص كلما تواترت الأخطاء في بث الأرقام ، وهكذا فلن  
نبقى في حدود أقل ما يمكن من الأخطاء علينا اننا نناقص سرعة الإرسال بحيث  
تكون مساوية لسعة القناة أو أقل من تلك السعة .

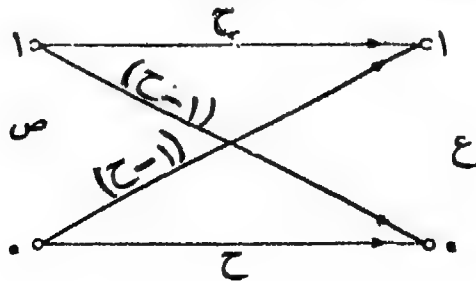
كيف نستطيع تحقيق هذه النتيجة ؟ نستذكر أن الترميز الفعال  
لمصدر معلوماتي يستلزم دمج عدد كبير من الأحرف مع بعضها وترميز  
الرسالة كمجموعة من التراكيب الطويلة . ينطبق هذا على الاستخدام  
الفعال للقناة ذات الضجيج ، إذ يجب أن نتعامل مع تراكيب طويلة من  
الأحرف المستقبلية ، بحيث يتألف كل تركيب من أكبر عدد ممكن من  
الأحرف . وما سيحدث ، هو أنه من بين كل التراكيب الممكنة ، سيقصر  
الإرسال والاستقبال على التراكيب التي يمكن أن ترد باحتمال غير مساوٍ  
للصفر .

يبحث شانون ، بهدف برهان نظريته المدرجة أعلاه ، عن القيمة  
الوسطية لتواتر الخطأ لكل أساليب الترميز الممكنة ، أي لكل الارتباطات  
الممكنة بين تراكيب دخل وتراكيب خرج معينة ، وذلك عندما يتم انتقاء

الرموز بشكل عشوائي ، ثم يمضي شانون ليثبت أنه عندما تكون سعة القناة أكبر من انتروبي المصدر فإن وسطي سرعة الخطأ مقدراً من أجل كل أساليب الترميز هذه يقترب من الصفر كلما ازداد طول التركيب . إذا استطننا الحصول على هذه النتيجة الجيدة بعملية توسيط على كل طرق الترميز منتقاة بشكل عشوائي ، فلا بد أن واحدة من طرق الترميز هذه تفضي الى هذه النتيجة الجيدة . لقد وصف احد نظريي المعلومات طريقة البرهان هذه بكونها في منتهى الغرابة ، ولعلها كذلك لأنها لن تخطر على بال رياضي غير موهوب ، وربما أن الموضوع برمته ما كان ليخطر على بل رياضي غير موهوب أيضاً .

ان المعالجة السابقة لها صفة العمومية ، لذا فهي تنطبق على كل المسائل الا أنني اعتقد أن العودة الى مثال القناة الثنائية ذات الاخطاء سيلقي مزيداً من الاضواء على الموضوع ، وقد سبق أن بحثنا هذه القناة في الفصل الحالي وأوضحها الشكل ٨ - ١ . لنر ما يمكن أن نقوله نظرية شانون عن هذا المثال البسيط والشائع .

نفرض أن احتمال ارسال الـ ١ عبر القناة واستقباله ١ أيضاً هو  $C$  ، وهو نفس احتمال ارسال الـ ١ عبر القناة واستقباله ٠ ، وهكذا يكون احتمال استقبال الـ ١ بدلاً من الـ ٠ المرسل واستقبال الـ ٠ بدلاً من الـ ١ المرسل هو :  $(1 - C)$  . نفرض أكثر من ذلك أن كل هذه الاحتمالات لا تتوقف على الماضي ولا تتغير مع الوقت . يعطي الشكل ٨ - ٤ التمثيل المجرد لهذه القناة كقناة ثنائية متناظرة (بنفس أسلوب الشكل ٨ - ٢) ، وقد غيرنا رمز الحرف المرسل الى ص .



الشكل ٨ - ٤



تتحقق السرعة العظمى لارسال المعلومات عبر هذه القناة ، اي نصل الى سعتها ، اذا توفر مصدر ارسال يولد الرمز ١ بنفس احتمال توليد الرمز ٠ ، وذلك بسبب تناظر هذه القناة . وهكذا ففي حالة ص ١ وايضا في حالة ع بسبب التناظر ) :  

$$ح (١) = ح (٠) = \frac{1}{2}$$
ووفق ما تقدم :

$$ت (ص) = ت (ع) = - ( \frac{1}{2} \log \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \log \frac{1}{2} )$$

= ١ بيت لكل رمز

ماذا عن الاحتمالات الشرطية والالتباس في القناة ؟ سنتسهم في الانتروبي الشرطية اربعة حدود . المصادر والمساهمات هي :

احتمال استقبال ال ١ هو  $\frac{1}{2}$  . عندما يتم تلقي ال ١ ، يكون احتمال ان ال ١ هو المرسل مساويا ل ح ، واحتمال ان ال ٠ هو المرسل مساويا ل (١ - ح) . ان مساهمة هذه الاحداث في الالتباس هي :

$$\frac{1}{2} [ - ح \log ح - (١ - ح) \log (١ - ح) ]$$

اذا اعدنا هذه المناقشة من اجل احتمال استقبال ال ٠ ، نحصل على مساهمة في الالتباس مساوية للمساهمة الاخيرة .

وهكذا فمن اجل القناة الثنائية التناظرة ، يساوي الالتباس مجموع هذه الحدود :  

$$ت (ص) = - ح \log ح - (١ - ح) \log (١ - ح)$$
وتكون السعة :  

$$س = ١ + ح \log ح + (١ - ح) \log (١ - ح) .$$

لنلاحظ ان هذه السعة تساوي الواحد مطروحا منه التابع الموقع في الشكل ٥ - ١ . اذا كان ح =  $\frac{1}{2}$  ، كانت س = ١ ، وهذا طبيعي لاننا اذا استقبلنا ١ في هذه الحالة ، يتساوى احتمال ان يكون الرقم المرسل ١ مع احتمال ان يكون الرقم المرسل ٠ ، وهكذا لا تساهم الرسالة المستقبلية في حل الرئية المتعلقة بالرقم المرسل . كما يبدو من العلاقة

الآخيرة أن قيمة السعة هي نفسها من أجل  $C = 0$  ،  $C = 1$  . إذ أن الاستقبال الدائم لـ 1 في حالة إرسال الـ 1 ، والاستقبال الدائم لـ 1 في حالة إرسال الـ 0 . سيجعل وثوقيتنا من المرسل في هذه الحالة مطابقة لوثوقيتنا به عندما نستقبل وبشكل مستمر الـ 1 الذي أرسل الـ 1 والـ 0 .

إذا كانت القيمة الوسطية للخطأ مساوية لرقم واحد من أصل كل عشرة ، انخفضت سعة القناة إلى ٥٣ ٪ من قيمتها في حالة الإرسال العاري عن الخطأ ، أما إذا كانت القيمة الوسطية ١ ٪ ، انخفضت السعة إلى ٩٢ ٪ .

يعترف الكاتب عند هذه المرحلة أن بساطة النتيجة التي حصلنا عليها في حالة القناة الثنائية المتناظرة لها دور مضلل بالفعل ، فقد كانت مضللة بالنسبة للكاتب على الأقل . فإذا اعتبرنا قناة ثنائية غير متناظرة حيث احتمال استقبال الـ 1 في حالة إرساله هو  $C$  بينما احتمال استقبال الـ 0 في حالة إرساله هو احتمال مغاير  $P$  ، وحاولنا حساب السرعة المثلى عبر القناة ، أي سعة القناة ، لوقعنا في ورطة فعلاً . أما الأفضلية الأكثر تعقيداً فتطرح مسائل قد تكون مستحيلة الحل .

هذا هو السبب في الاهتمام الكبير الذي أولي للأفضلية الثنائية المتناظرة ، إضافة لأهميتها العملية . ماهو نوع الترميز الذي علينا تبينه كي نحقق إرسالاً عديم الأخطاء عبر هذه القناة . ذكر شانون في بحثه الأول الأمثلة التي طرحها ر. و. هامينغ . نشر مارسيل ج. إي. جولاي عام ١٩٤٩ طرق الترميز المصححة للأخطاء ، بينما نشر هامينغ بحثه عام ١٩٥٠ . يجب أن نذكر أن هذه الأمثلة قد صممت بعيد عمل شانون . ويمكن أن تكون قد خطرت لأصحابها قبل ذلك ، إلا أن بحث شانون في الإرسال العاري عن الأخطاء ، شجع العلماء على طرح التساؤل التالي : كيف لنا أن نحقق ذلك .

رأينا ان تحقيق التصحيح الفعال للاخطاء يتم اذا اعتبر الرمز سلاسل اطول من ارقام الرسالة . نفرض على سبيل المثال اننا نرمز ارقام رسالتنا في تراكيب مكونة من ١٦ رقم ونضع بعد كل تركيب ارقام ضابطة تمكن من اكتشاف خطأ وحيد سواء اكان في ارقام الرسالة او في الارقام الضابطة . نعتبر كمثال خاص الرسالة المكونة من سلسلة الارقام : ١١٠٠١٠١٠١٠٠١٠٠٠ . لايجاد الارقام الضابطة المناسبة نكتب هذه السلسلة في الجدول الموضح في الشكل ٨ - ٥ .

	٠	٠	١	١
١	١	١	٠	١
٠	٠	٠	١	١
٠	٠	١	٠	١
١	١	٠	٠	٠

الشكل ٨ - ٥

نربط بكل سطر او عمود من الجدول دائرة ، ثم نضع في داخل الدائرة . او ١ بحيث يصبح عدد مرات ورود ال ١ في السطر المعتبر او العمود زوجياً . نطلق على هذه الارقام اسم الارقام الضابطة . اذا عددنا عدد مرات ورود ال ١ في كل سطر وكل عمود من مثالنا هذا بعد اضافة الارقام الضابطة ، نحصل على النتائج التالية :

الاعمدة معتبرة من اليمين الى اليسار : ٤ ، ٢ ، ٢ ، ٢  
الاسطر معتبرة من الاسفل الى الاعلى : ٢ ، ٢ ، ٢ ، ٤

ماذا يحدث لو ارسل احد الارقام خطأ من اصل الرسالة المكونة من ١٦ رقم . سيصبح عدد مرات ورود ال ١ فردياً في أحد الاسطر وأحد الاعمدة ، وهذا يدفعنا لتبديل الرقم في الموقع حيث يتقاطع السطر والعمود المعنيين .

وماذا يحدث لو أن خطأ وقع في أحد الارقام الضابطة . سيصبح عدد مرات ورود ال ١ فردياً في أحد الاعمدة . لقد اكتشفنا خطأ في هذه الحالة، الا أنه لم يكن بين ارقام الرسالة .

ان مجموع الارقام المرسله لرسالة مكونة من ١٦ رقم هو  $16 + 8 = 24$  رقم ، وهكذا زاد عدد الارقام المرسله بنسبة  $\frac{24}{16}$  لو بدانا برسالة مكونة من ٤٠٠ رقم لاحتجنا الى ٤٠ رقم ضابط ولكانت نسبة الزيادة في هذه الحالة :  $\frac{440}{400} = 1.1$  . ولكن بإمكاننا تصحيح خطأ من اصل ٤٤٠ رقم بدلاً من تصحيح خطأ من اصل ٢٤ رقم .

نستطيع تصميم اساليب ترميز أخرى بهدف تصحيح عدد اكبر من الاخطاء في تركيب من الاحرف المرسله . طبعاً اذا اردنا تصحيح عدد اكبر من الاخطاء لاحتجنا بالمقابل لعدد اكبر من الارقام الضابطة . نعتبر ترميزاً آخر ، مهما كانت طريقة تصميمه ، يفضي الى تراكيب عددها  $2^m$  يتكون كل منها من م رقم ثنائي ، وهي تمثل كل التراكيب الممكنة في هذه الحالة والتي نرغب ايضاً بارسالها . سنحتاج في واقع الامر الى عدد اكبر من الارقام الثنائية في كل تركيب لتغطية الحاجة من الارقام الضابطة .

عندما نستقبل تراكيباً معيناً من الأرقام ، يجب أن يكون بمقدورنا ان نستنتج منه أي التراكيب هو الذي ارسل فعلاً ، على الرغم من وقوع بعض الاخطاء فيه وبالطبع نخطأ ( استبدال عدد من حالات ورود ال ١ )

ب . ، ، والعكس . يقول الرياضي أن ذلك ممكن إذا كان البعد بين تركيبين متتالين يحتوي على الأقل على عدد من الأرقام الثنائية مساوٍ لـ ( ٢ + ١ ) .

لقد استخدم هنا مصطلح البعد بشكل غريب فعلاً ، بهدف تحقيق الغايات التي يسعى الرياضي إليها . نعني بالبعد هنا عدد الأرقام الثنائية في التركيب الأول التي يجب استبدالها كي نحصل على التركيب الثاني . مثلاً البعد بين ٠٠١٠ و ١٠١١١ هو ٣ ذلك لأننا نحصل على أي من التركيبين باستبدال ٣ أرقام ثنائية في التركيب الآخر .

عندما نتركب عدداً من الأخطاء في الإرسال مقدارها ن ، يكون البعد بين التركيب الذي نستقبله وذاك الذي أرسل مساوياً لـ ن ، وقد يكون التركيب المستقبل أقرب بـ ن رقم من تركيب آخر . إذا أردنا أن نتأكد من كون التركيب المستقبل أقرب على الدوام من التركيب المرسل منه إلى أي تركيب آخر ، لوجب أن يكون البعد الأصغري بين أي تركيبين من نظام الترميز ( ٢ + ١ ) .

نطرح إذن مسألة الترميز وفق تراكيب على النحو التالي : كيف يمكن أن نجد مجموعة من التراكيب عددها ٢ تركيب ، يحتوي كل منها على نفس العدد من الأرقام الثنائية ، وهو عدد يجب أن يكون أكبر من م ، بحيث يكون البعد الأصغري بين كل تركيبين مساوياً لـ ( ٢ + ١ ) . يجب أن يتحقق إضافة لذلك كون التراكيب ذات طول أصغري .

برهنت طريقنا هامينغ وجوالي أنهما فعالتان ، كما أبدعت طرق ترميز فعالة أخرى .

نشير هنا إلى مشكلة أخرى في ترميز التراكيب ، هي وجوب كون الطريقة المعتمدة عملية الطابع خاصة فيما يتعلق بحل الرموز . أن مجرد إدراج الرموز المتنبأة لا يكفي ، فقد تكون اللائحة طويلة جداً . إن استخدام ٢٠ رقم ثنائي للترميز ( م = ٢٠ ) سينجم عنه جدول يحتوي

بحدود مليون تركيب مختلف من الرموز. يعني هذا أن اكتشاف التركيب الأقرب للتركيب المستقبل سيستغرق وقتاً طويلاً .

تزدنا النظرية الجبرية للترميز بوسائل ناجعة للترميز وحل الرموز وتصحيح العديد من الأخطاء . كان سليبيان هو السباق في هذا المجال ، ويمكننا إدراج عدد من أسماء المساهمين. وافق الطرائق التي ابتدعوها : رموز ويد - سولومون ، وايضاً رموز بوز - شودهوري . أما ألوين بريكامب فقد قدم أساليب رياضية جيدة لحساب التركيب الأقرب للتركيب المستقبل .

تقدم طريقة الترميز الالتفافية واسطة أخرى لتصحيح الأخطاء ، نعتبر وفق هذه الطريقة الجزء الأخير من التركيب الثنائي الذي سيرسل والمكون من م رقم ثنائي ونحفظه في خزان معلومات إضافية . كلما تمت تغذية رقم ثنائي جديد ، يرسل المرمز ٢ أو ٣ أو ٤ أرقام ثنائية ، وهذه الأرقام المرسلّة تنتج عن جمع الأرقام الثنائية في خزان المعلومات الإضافي ولكن بدون حمل من خانة لأخرى .

تعود هذه الطريقة أصلاً الى الياس ، إلا أن البحث الأول الذي نشر حول موضوع الترميز وحل الرموز أتى عام ١٩٥٨ من خلال تسجيل براءة اختراع لـ د. و. هاجيلبارجر . أما الاستخدام الأول للطريقة فقد بدأ عام ١٩٦٧ على يد اندريه . ج. فيتربي الذي اخترع طريقة مثلى وبسيطة لحل الرموز دميت باسم حل الرموز بأعظم احتمال ممكن .

تستخدم هذه الطريقة اليوم في الأقنية ذات الضجيج الهامة كإرسال الصور من مركبة فويجير عن المشتري وأتباعه . إن أهمية الطريقة تتجسد باستخدامها شدة وإشارة النبضة المستقبلية .

إذا استقبلنا نبضة موجبة صغيرة فكاننا استقبلنا نبضة سالبة مع ضجيج ولا يعقل أن تكون نبضة موجبة مع ضجيج . أما إذا استقبلنا نبضة موجبة كبيرة فالأرجح أنها نبضة موجبة مع ضجيج وليست نبضة سالبة مع ضجيج . تستخدم الطريقة المشار إليها هذه الملاحظات .

يستخدم الترميز في تراكيب بهدف حماية المعلومات ذات الأهمية المخزنة في الكمبيوتر . ويستخدم أيضاً في إرسال المعلومات عبر الأقنية ذات الضجيج المنخفض .

تعرض معظم الدارات المستخدمة لنقل المعلومات الى اندفاعات طويلة من الضجيج . عندما يحدث ذلك ، تكون الطريقة المثلى في تصحيح الخطأ هي تقسيم الرسالة الى تراكيب من الأرقام واستخدام طريقة بسيطة لاكتشاف الخطأ . اذا اكتشف الخطأ في التركيب المستقبل ، يصبح عندها من المفضل إعادة إرسال التركيب .

يجد الرياضيون في طريقة الترميز بالتراكيب متعة وتحدياً في وقت واحد. لذا أصبحت نظرية المعلومات وفق بعضهم نظرية جبرية للترميز. ان نظرية الترميز غاية في الأهمية لنظرية المعلومات . لقد كانت نظرية المعلومات في بدايتها ، أي عند طرح عمل شانون ، أكثر شمولاً . يجب أن نعتبر ترميز المصدر وكذلك ترميز القناة في إطار موضوع الترميز .

بحثنا في الفصل السابع طرق التخلص من الفزارة بحيث يمكن بث الرسالة بعدد أقل من الأرقام . أما في هذا الفصل فقد رأينا كيفية إضافة سعة الفزارة الى رسالة تفتقر إليها بهدف تحقيق إرسال افتراضي خالٍ من الأخطاء عبر قناة ذات ضجيج . لقد أذهلت الرياضيين والمهندسين فكرة أن مثل هذا التحقيق ممكن ، أما شانون فقد برهن الفكرة واثبت أنها قليلة التحقيق فعلاً .

سيكون المستقبل في ريبة ، قبل استلامه الرسالة المبتوتة عبر قناة خالية من الأخطاء ، عن الرسالة المعينة من مجموعة الرسائل الممكنة التي سيقوم المصدر بإرسالها فعلاً . ان قيمة هذه الريبة هي سرعة إصدار المعلومات من المصدر أو الانتروبي الخاصة به مقاسة بالبيت لكل رمز ولكل نانية . ستحل ريبة المستقبل هذه تماماً إذا تلقى نسخة مطابقة للرسالة التي بثت .

يمكن بث الرسالة بنبضات كهربائية سالبة وموجبة . إذا أضيف إلى الرسالة ضجيج مؤلف من نبضات عشوائية سالبة وموجبة ، فيمكن أن تنقلب النبضات الموجبة سالبة والسالبة موجبة . إذا استخدمت مثل هذه القناة للبث فعلاً ، فسيكون هنا ريبة ما فيما يتعلق بالإشارة التي سيتلقاها المستقبل عند إرسال المصدر إشارة معينة .

عندما يتلقى المستقبل رسالة معينة عبر قناة ذات ضجيج ، فسيكون بالطبع على علم أكيد بما وصله ، إلا أنه لن يستطيع التأكد بشكل كامل عن الرسالة التي صدرت فعلاً من الجانب الآخر ، أي المرسل . وهكذا فلن تحل الريبة عنده حتى لدى وصول الرسالة إليه . تعتمد الريبة المتبقية على احتمال أن تكون الإشارة المستقبلية مخالفة للإشارة الصادرة .

إن ريبة المستقبل حول الرسالة الفعلية ، هي من وجهة نظر المرسل مجموع انتروبي أو ريبة مصدر الرسائل وريبة المستقبل حول الرسالة الصادرة عند علمه الأكيد بالرسالة المستقبلية . يستخدم شانون كمعيار لهذه الريبة الأخيرة ما يسميه الالتباس في القناة ، ويعرف سرعة إرسال المعلومات كحاصل طرح هذا الالتباس من انتروبي الرسالة .

تعتمد سرعة إرسال المعلومات على كمية الضجيج أو الريبة في القناة ، وعلى طبيعة المصدر المرسل . نفترض أننا اخترنا مصدر للإرسال يؤمن لنا قيمة عظمى بسرعة الإرسال ، نصلح في هذه الحالة على تسمية القيمة العظمى المحققة بسعة القناة ذات الضجيج ونقيسها بالبيت لكل رمز أو البيت لكل ثانية .

إن مفهوم سعة القناة حتى الآن قد انحصر في كونه كمية رياضية معرفة يمكن حسابها إذا عرفنا احتمالات الأنواع المختلفة للأخطاء والممكنة في بث الرسائل . إلا أن هذا المفهوم ، أي مفهوم سعة القناة ، هو مفهوم هام للغاية ، لأن شانون يبرهن ، من خلال نظريته الأساسية عن الإقنية ذات الضجيج ، أنه إذا كانت انتروبي المصدر أقل من سعة القناة ، فيمكن ترميز الرسائل التي يولدها المصدر بحيث يمكن بثها عبر القناة ذات الضجيج بخطأ صغير لا يتجاوز حداً معروفاً بشكل مسبق .



ان تحقيق بث الرسائل بدون اخطاء عبر اقنية ذات ضجيج ، يتطلب جميع سلاسل كبيرة من الرموز ومزاجها في رموز أكبر . هذا هو بالضبط ترميز التراكيب الذي واجهناه سابقاً ، إلا أننا نرجع اليه لهدف آخر . فهنا لا نستخدمه للتخلص من غزارة الرسائل التي يسببها المصدر ، بل على العكس للزيادة في الغزارة بحيث نتمكن من بث الرسائل عبر الاقنية ذات الضجيج وبدون خطأ . ان جوهر مشكلة الاتصالات الفعالة والخالية من الأخطاء هو في واقع الأمر ، كيفية تخليص الرسائل من الغزارة غير الفعالة الموجودة فيها وإضافة عوضاً عنها غزارة من نوع ملائم تمكن من اكتشاف وتصحيح أخطاء الإرسال .

ان الأرقام المضافة لهذه الغاية ستبطل من سرعة الإرسال . لقد رأينا ان استخدام قناة ثنائية متناظرة يصل الى المستقبل عبرها رقم واحد غير صحيح من اصل ١٠٠ رقم مرسل ، يقيد نسبة بث الرسائل عبرها بقيمة ٩٢٪ . يعني ذلك وسطياً ، أن اعتبارنا لرسالة مؤلفة من ٩٢ رقم وخالية من الغزارة ، يفرض علينا أن نضمنها ٨ أرقام إضافية ضابطة جاعلين بذلك مجمل وفق الأرقام غزيراً .

يلعب عمل شانون بالنسبة اليها دور المرشد ، إلا أن الصعوبات الرياضية التي تواجهنا عند التعامل مع الاقنية المعقدة هي صعوبات جمة للغاية ، وحتى في حالة القناة الثنائية البسيطة المتناظرة والتي تعتمد القاطع والواصل ، فإن مشكلة البحث عن الترميز الفعال هي مشكلة كبيرة جداً ، لهذا على الرغم من أن الرياضيين قد أبدعوا عدداً كبيراً من طرق الترميز الممتازة ، ولكن يا للأسف تبقى هذه الطرق بدورها صعبة التطبيق العملي .

هل يعني ذلك أننا نقدم صورة مشجعة ؟ اكم نحن اليوم أكثر حكمة بالمقارنة مع الفترة السابقة لنظرية المعلومات ، إذ أننا نعرف ما هي المشكلة، ونعرف من حيث المبدأ ما الذي يجب علينا عمله، وقد ادهشت النتائج المهندسين والرياضيين . وأكثر من ذلك فبحوزتنا طرائق فعالة للترميز ومصححة للأخطاء في نفس الوقت يمكن تطبيقها في مجالات متعددة أهمها بث صورة الكواكب الى الأرض من مركبات الفضاء البعيدة .



## الفصل التاسع

### حدة أبعاد

عثرت منذ سنين بعيدة ( حوالي ثلاثين سنة ) في مكتبة سانت بول العامة على كتاب أطلعني على غوامض البعد الرابع . كان عنوان الكتاب الأرض المسطحة لمؤلفه آيوت ، وقد تناول بالوصف عالماً ذي بعدين عديم السماكة . يمكن رسم هذا العالم وكل كائناته بكل تفاصيلها على صفحة من الورق .

لا أزال أتذكر بعجب حتى الآن خصائص المجتمع في الأرض المسطحة، فالكائنات هناك مضلعة ، وعدد الأضلاع يشير الى الوضع الاجتماعي . تمنح أكثر الكائنات رفعة من بين الكائنات المتعددة الأضلاع مرتبة الدائرة . أما أقل الكائنات أهمية فهي المثلثات المتساوية الساقين ، أما المتساوية الأضلاع فهي أرفع بدرجة لأن الانتظام مطلوب ومحترم . وكانت ، في الواقع ، الأطفال غير المنتظمة تكسر ويعاد تشكيلها بانتظام ، وكانت هذه العملية في كثير من الأحيان مهلكة . أما الإناث في ذلك المجتمع فكانوا شديدي النحافة واشبه بكائنات إيرية ، وقد انتزعن الإعجاب بمشيتهن المتمايلة . أما المربع فيتلاءم مع كل ما نبغي من ربط الأرض المسطحة به .

وللأرض المسطحة أخلاقياتها الرياضية أيضا . يندهش بطل الرواية عندما تظهر في عالمه فجأة دائرة متغيرة المساحة ، فالدائرة هذه هي تقاطع كائن ثلاثي الأبعاد وهو الكرة مع الأرض المسطحة . تشرح الكرة أسرار

عالم الأبعاد الثلاثة للمربع الذي يبدأ بدوره القاء المواقف عن المذهب الغريب . يترك الكتاب قارئه وقد سيطر عليه شعور بإمكانية أن يواجه هو نفسه في أحد الأيام كائنات متموجاً متخفياً ، هو في واقع الأمر تقاطع كائن رباعي الأبعاد مع عالمنا الثلاثي الأبعاد .

تشكل المكعبات الرباعية الأبعاد وما يعاثلها من كرات وأشكال هندسية أخرى مادة تقليدية لأبحاث الرياضيين وكتابات مؤلفي الخيال العلمي . لتتخيل عالماً رباعي الأبعاد يشبه عالمنا الثلاثي الأبعاد ويضم بين ثناياه عوالم كثيرة ثلاثية ، قريبة من بعضها كما صفحات المخطوطة ، إلا أنها منفصلة ومختلفة بتشكيلاتها عن بعضها . ونبعد في خيالنا أكثر بتصورنا إمكانية الانتقال من أحد هذه العوالم إلى عالم آخر عبر العالم الرباعي الأبعاد المحيط ، فنصل مثلاً إلى أحشاء مريض لاستئصال زائده الدودية .

لقد سمع الكثيرون منا أن أينشتاين قد استخدم الزمن كبعد رابع ، كما سمع البعض عن فراغات الأطوار المتعددة الأبعاد في الفيزياء حيث تعتبر المركبات الثلاثة للموقع والمركبات الثلاثة للسرعة جميعها بمثابة إحداثيات في عالم سداسي الأبعاد .

تختلف هذه المفاهيم ، على كل حال ، عن الفكرة الكلاسيكية للبعد الرابع والذي يشبه تماماً الأبعاد المألوفة للمكان التي نعيشها ونعرفها جيداً وهي أبعاد فوق وتحت ، يمين ويسار ، أمام وخلف . ترجع القضية إلى رياضيي القرن التاسع عشر الذين نجحوا بتعميم الهندسة بحيث تتضمن عدة أبعاد بل ولا نهاية من الأبعاد .

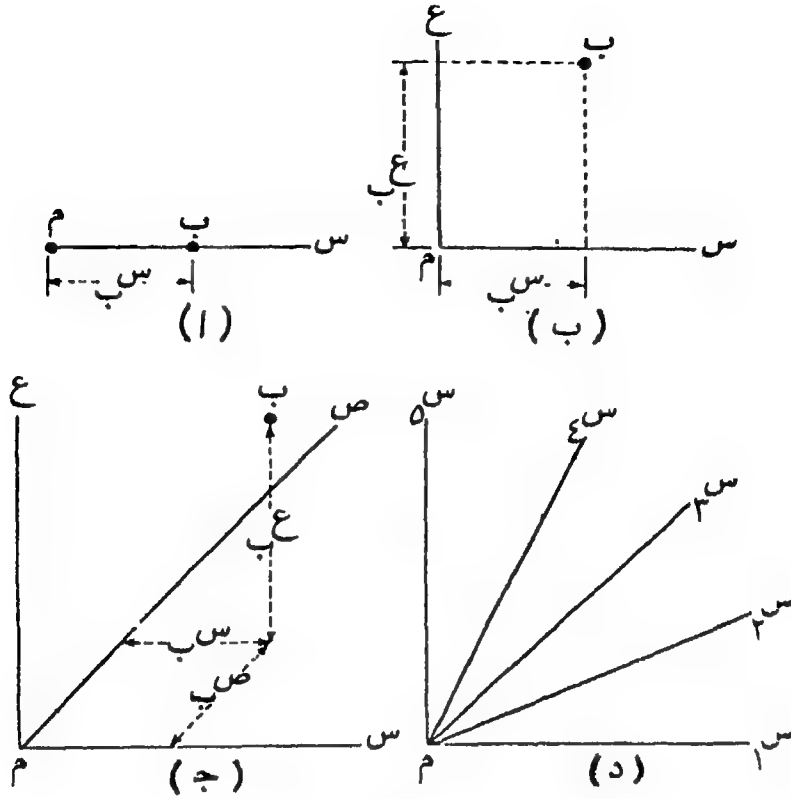
يقف الرياضي من هذه الأبعاد على أنها مجرد تشكيلات عقلية . يبدأ بخط يدعو اتجاه س أو محور السينات ، كما يوضح الشكل ٩ - ١ . تقع نقطة ما - ب - على يمين مبدأ الإحداثيات م على محور السينات . يحدد الإحداثي س<sub>ب</sub> في الحقيقة موقع النقطة ب .

يضيف الرياضي بعد ذلك خطاً آخر عمودياً على محور السينات هو محور العيّنات م ع ويستطيع تحديد موقع النقطة ب في عالم البعدين أو المستوي حيث يقع هذان المحوران باستخدام عددين أو إحداثيين : البعد عن النقطة م باتجاه المحور م ع ، أي الارتفاع ع ب ، ، والبعد من النقطة م باتجاه المحور م س ، أي البعد الأفقي للنقطة ب .

يوضح الشكل ٩ - ١ أيضاً حالة ثلاثة محاور من المفروض أن تكون متعامدة مع بعضها مثنى مثنى ، كما في حالة أحرف المكعب . تمثل هذه المحاور الفراغ الثلاثي الأبعاد الذي نعيش ضمنه ، ويتحدد موقع نقطة ب بإحداثياتها الثلاثة س ب ، ص ب ، ع ب .

طبعاً المحاور الثلاثة كما هي واردة في الشكل غير متعامدة مع بعضها . فما نملكه هنا هو إسقاط منظوري من عالم الأبعاد الثلاثي إلى عالم البعدين لمحاور ثلاثة هي في واقعها ضمن العالم الثلاثي الأبعاد متعامدة . يقدم لنا القسم الأخير من الشكل ٩ - ١ مسقطاً على عالم البعدين لمحاور الإحداثيات في العالم الخماسي الأبعاد . وقد غيرنا هنا المصطلحات قليلاً ، إذ أن ارتقائنا في العوالم المتعددة الأبعاد سيستنفذ الأحرف الأبجدية بسرعة ، وهكذا عوضاً عن الإشارة إلى الإحداثيات بالأحرف س ، ع ، ص ، أشرنا إليها بالرموز : س ١ ، س ٢ ، س ٣ ، س ٤ ، س ٥ ، تملأ كما يفعل الرياضيون .

مرة أخرى المحاور الخمسة ليست متعامدة في الشكل كما هي الحال في حالة المحاور الثلاثة ، كما أننا لا نستطيع رسم خمسة محاور متعامدة مثنى مثنى في فراغنا الثلاثي الأبعاد ، إلا أن الرياضي يستطيع التعامل مع مثل هذه المحاور المتعامدة بشكل عقلي ومنطقي . ويستطيع كذلك جرد الصفات المختلفة للأشكال الهندسية في الفراغ الخماسي الأبعاد حيث تحدد النقطة بإحداثياتها الخمسة :



الشكل ٩ - ١

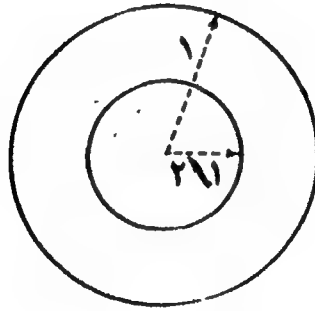
س١ب ، س٢ب ، س٣ب ، س٤ب ، س٥ب . وإكمال المشابهة مع الفراغ العادي ( الفراغ الإقليدي ) يقول الرياضي أن مربع بعد النقطة ب عن مبدأ الاحداثيات م يعطي بالعلاقة :

$$مب^2 = د^2 = س١ب^2 + س٢ب^2 + س٣ب^2 + س٤ب^2 + س٥ب^2$$

يعرف الرياضيون حجم المكعب في الفراغ المتعدد الأبعاد على أنه جلاء أضلاعه . وهكذا ففي الفراغ ذي البعدين ، المكعب المعني هو المربع ،

وحجمه في هذه الحالة هو مساحة المربع وتساوي لـ ٢ ، حيث ل هو ضلع المربع ، يصبح هذا الرقم لـ ٢ في الفراغ الثلاثي الأبعاد ، حيث ل هو ضلع المكعب المألوف . وفي حالة الفراغ الخماسي الأبعاد يعطي حجم المكعب ذي الضلع ل بالقيمة له ، وفي الفراغ ذي ٩٩ بعد يكون حجم المكعب بالمقابل : ل ٩٩ .

تتسم خصائص بعض الأشكال في الفراغات المتعددة الأبعاد بكونها سهلة إذا أردنا فهمها ، ومدهشة إذا أردنا اعتبارها . نعتبر على سبيل المثال الحلقة المبينة في الشكل ٩ - ٢ والمولدة من دائرتين متمركزتين نصف قطريهما :  $\frac{1}{2}$  ، ١ .



الشكل ٩ - ٢

ان مساحة الدائرة ( الحجم في عالم البعدين ) هي  $\pi \times ٢$  ، حيث ر هو نصف قطرها ، وبذلك تكون مساحة الدائرة الكبيرة  $\pi$  ومساحة الصغيرة  $\frac{\pi}{4}$  ، وهكذا يقع ربع المساحة الكلية داخل الدائرة الصغيرة .

نفرض ان الشكل ٩ - ٢ يمثل كرات ، يساوي حجم الكرة  $\frac{4}{3}$

III ٢ وهكذا يقع  $\frac{1}{4}$  الحجم الكلي للكرة داخل الكرة الصغيرة التي نصف قطرها  $\frac{1}{2}$  . نعم ما تقدم بقولنا ، إن حجم الكرة في الفراغ ذي البعدن يتناسب مع  $r^3$  ، لذلك فإذا اعتبرنا كرة في هذا الفراغ نصف قطرها ١ ، فإن الجزء من حجمها الواقع داخل كرة متمركزة معها ونصف قطرها  $\frac{1}{4}$  ، هذا الجزء من الحجم يساوي  $\frac{1}{64}$  ، وهكذا إذا كنا في عالم سبيلي الأبعاد أي إذا كانت  $n = 7$  ، فإن هذا الجزء يساوي  $\frac{1}{128}$  .

نستطيع أن نعمم باتجاه آخر حيث نعتبر جزء الكرة ذات قطر  $r$  المحتوى في كرة متمركزة معها نصف قطرها ٩٩.  $r$  . نجد في حالة فراغ ذي ١٠٠٠ بعد أن هذا الجزء من الحجم هو ٤.٠٠٠.٠٠٠. فقط . وهكذا نحن الآن إزاء النتيجة التي لا مفر منها ، ألا وهي أنه في حالة كرة مغمورة في فراغ متعدد الأبعاد وعدد أبعاده كبير للغاية فإن كل الحجم تقريباً يقع بقرب السطح .

أولست كل هذه الأفكار مجرد رياضيات بحثة ملأمة للنخبة فقط . نعم سيبقى هذا هو طابع هذه الأفكار إلى أن نربطها بمسائل العالم الفيزيائي . كان للأعداد التخيلية مثل  $\sqrt{-1}$  نفس الوضع في يوم من الأيام ، إذ لم يكن لها أي قيمة فيزيائية ، ثم ما لبثت أن تسربت إلى العالم الواقعي فأصبح لها معانٍ فيزيائية وأخرى هندسية كهربائية . هل نتمكن من إيجاد حالة فيزيائية تنطبق عليها خصائص الهندسات المتعددة الأبعاد . نعم يمكننا ذلك ، وخاصة في نظرية الاتصالات . لقد استخدم شانون الهندسة المتعددة الأبعاد لبرهان نظرية هامة تتعلق بإرسال الإشارات المستمرة ذات الحزم المحددة وبوجود الضجيج .

يقدم لنا عمل شانون مثالا رائعا عن استخدام وجهة نظر جديدة واستثمار نتائج فرع من الرياضيات لم يأخذ طريقه إلى التطبيق بعد ( في هذه الحالة الهندسة المتعددة الأبعاد ) وذلك لحل مشكلة ذات أهمية



عملية كبيرة . اقترح أن نخرج على جانب واسع من محاكبات شانون ، لأنها كما اعتقد تشكل مثالا ممتازاً عن الرياضيات التطبيقية . إن تفاصيل هذه المعالجات الرياضية هي غير مالوفة أكثر من كونها صعبة ، وعلى القارئ أن يركب متنها على حسابه الخاص .

يجب أن نتبنى معياراً عاماً لشدة الإشارة والضجيج وذلك لتحقيق تناول أمثل لمسألة ارسال الإشارات المستمرة بوجود الضجيج . تثبت الطاقة أنها المعيار المناسب والمفيد في هذا المعرض .

عندما نبذل قوة مقدارها ١ كغ لمسافة ١ متر لرفع ثقل مقداره ١ كغ لارتفاع ١ متر نقول أننا قمنا بعمل متساوي قيمته ١ كيلو غرامتر ويصبح لدى الوزن بسبب الارتفاع قدرة تساوي ١ كيلو غرامتر . يمكن لهذا الوزن في حالة سقوطه أن يقدم عملاً مكافئاً لقدرته يستخدم مثلاً لإدارة جهاز ما .

تعرف الطاقة بأنها سرعة تقديم العمل . فإذا قدمت آلة ما عملاً مقداره ٦٠ كيلو غرامتر في الدقيقة ، كانت طاقتها ١ كيلو غرامتر في الثانية .

تستخدم الفيزياء وحدات معتمدة للقدرة والطاقة ، فواحدة القدرة هي جول ، وواحدة الطاقة هي واط ، ويساوي الواط جول واحد في الثانية .

إذا ضاعفنا الكمون الكهربائي لإشارة ، نزيد إذ ذاك قدرتها وطاقتها بأربعة مرات ، لأن الطاقة والقدرة كلاهما تتناسب مع مربع ذلك الكمون .

رأينا في الفصل الرابع أنه يمكننا تمثيل الإشارة المستمرة بشكل كامل بعدد من العينات مساوٍ لـ ٢ س في كل ثانية إذا كان عرض حزامها س . وبالعكس يمكننا بناء إشارة مستمرة ذات حزام محدود تمر من ٢ س نقطة ممثلة لنفس العدد من العينات التي نختارها في كل ثانية .

نستطيع تحديد وتغيير كل عينة بشكل اختياري دون تغيير باقي العينات ،  
ويترتب على ذلك تغيير الإشارة المحدودة الحزام .

نقيس ساعات العينات بالفولط ، وتمثل كل عينة قدرة متناسبة مع  
مربع هذه السعة .

وهكذا نستطيع التعبير عن مربعات ساعات العينات بدلالة القدرة .  
نقبل بأن القدرة تساوي مربع سعة العينة إذا تبيننا وحدات خاصة  
لقياس القدرة ، إن ذلك لن يسبب لنا أي متاعب إضافية .

نصطلح على تسمية ساعات العينات المتتالية والمنتقاة بشكل صحيح  
من إشارة محدودة الحزمة والمقاسة ربما بالفولط ، بالتسميات :  
س<sub>١</sub> ، س<sub>٢</sub> ، س<sub>٣</sub> ، ..... الخ ، وستمثل القدرات المقابلة تبعاً لذلك  
بالرموز : س<sub>١</sub><sup>٢</sup> ، س<sub>٢</sub><sup>٢</sup> ، س<sub>٣</sub><sup>٢</sup> ، ..... الخ . أما القدرة الكلية للإشارة  
والتي نرمز لها بالرمز ق ، فتساوي مجموع قدرات العينات أي :

$$ق = س_١^٢ + س_٢^٢ + س_٣^٢ + ..... الخ$$

نلاحظ أنه من وجهة نظر الهندسة المتعددة الأبعاد ، تساوي القدرة  
ق مربع بعد نقطة عن مركز الإحداثيات ، إذا كانت إحداثيات هذه النقطة  
هي س<sub>١</sub> ، س<sub>٢</sub> ، س<sub>٣</sub> ، ..... الخ .

وهكذا إذا مثلنا ساعات العينات من إشارة محدودة الحزام بإحداثيات  
نقطة في فراغ متعدد الأبعاد ، كانت النقطة ذاتها ممثلة للإشارة الكاملة أي  
كل العينات مأخوذة دفعة واحدة ، كما يمثل مربع بعد النقطة عن مبدأ  
الإحداثيات قدرة الإشارة الكاملة .

لماذا ينبغي علينا تمثيل الإشارة بهذه الطريقة الهندسية ؟ السبب  
هو أن شانون فعل ذلك لبرهان نظرية هامة في نظرية الاتصالات تتعلق  
بتأثير الضجيج على إرسال الإشارات .

نستذكر النموذج الرياضي لمصدر الاشارات الذي تبيناه في الفصل الثالث عند محاولتنا البحث عن طريقة لتحقيق هذا الهدف . فقد فرضنا عندئذ ان المصدر ساكن ومستقر ، وما علينا هنا الا ان نسحب هذا الفرض على الضجيج المعبر وعلى جملة الاشارة والضجيج .

انه ليس امراً مستحيلاً من حيث المبدأ ان مصدراً كهذا سينتج الاشارة أو الضجيج وفق تتالٍ مديد من عينات عالية القدرة جداً أو منخفضة القدرة جداً ، وليست الاستحالة هنا بأكثر من استحالة توليد مصدر مستقر لسلاسل احرف ابجدية يتواتر فيها الحرف E بكثرة . الواقع ان الامر هذا قليل الاحتمال وحسب . نتعامل هنا مع النظرية التي واجهناها لأول مرة في الفصل الخامس . يولد المصدر المستقر صنفاً محتملاً من الرسائل وصنفاً غير محتمل اطلاقاً لدرجة اننا نتمكن من اهماله . تنطبق حالة الرسائل غير المحتملة عندما تكون الطاقة الوسطية للعينات المنتجة بعيدة جداً عن المتوسط الزمني ( ومتوسط المجموعة ) المميز للمصدر المستقر .

وهكذا فهناك طاقة متوسطة ذات معنى للاشارة في حالة كل الرسائل الطويلة التي علينا اعتبارها ، وهذه الطاقة المتوسطة غير متغيرة مع الوقت ونستطيع تحديدها باضافة القدرات لعدد كبير من العينات المتتالية ثم قسمة المجموع على الفترة الزمنية التي بثت خلالها هذه العينات . عندما نجعل هذه الفترة اكبر واكبر وعدد العينات اكثر واكثر ، تقترب من القيمة المتوسطة الصحيحة بشكل مطرد . ان الطاقة المتوسطة التي نحصل عليها بهذا الشكل ستكون هي نفسها بصرف النظر عن المجموعة المتتالية من العينات التي نعتبرها .

نستطيع اعادة صياغة ما تقدم في جمل مختلفة . لا يتغير مجموع قدرات عدد كبير من العينات المتتالية المنتجة من قبل مصدر مستقر الا في حدود طفيفة ومهملة ويبقى ثابتاً بصرف النظر عن المجموعة المعينة من العينات المتتالية التي نعتبرها . ان هذا ينطبق على كل الحالات تقريباً باستثناء حالات نادرة بعيدة الاحتمال جداً .

تمكننا حقيقة كون المصدر من النوع المستقر من قول المزيد . ان قدرة نفس العدد الكبير من العينات المتتالية ستكون من وجهة النظر العملية هي نفسها ، بصرف النظر عن الاشارة المعنية التي يولدها المصدر ، كما تنخفض الفروق بين القدرات بازدياد عدد العينات .

نمثل الاشارات المتولدة عن مصدر بنقاط في الفراغ المتعدد الأبعاد . نستعيض عن الاشارة التي عرض حزامها س ومدتها ز بعدد من العينات مساو لـ ٢ س ز ، ونعتبر سعة كل عينة مقابلة لواحد من احداثيات هذا الفراغ . اذا كانت القيمة المتوسطة لقدرة كل عينة هي ق ، كانت قدرة كل العينات هي ٢ س ز ق اذا كان العدد س ز كبيراً بما فيه الكفاية . رأينا ان القدرة الكلية تمثل بعد النقطة الممثلة للاشارة عن مبدأ الاحداثيات وهكذا عندما يزداد عدد العينات يكبر بالمقابل وبشكل تدريجي الحيز الذي تقع ضمنه النقاط الممثلة للاشارة المختلفة ذات الممد المتساوية والمنتجة من قبل المصدر ، أي تقترب تلك النقاط من سطح الكرة الكبيرة ذات نصف القطر :  $\sqrt{2 س ز ق}$  ان وقوع هذه النقاط بقرب السطح لا يبدو غريباً اذا تذكرنا انه من أجل جسم متعدد الأبعاد يقع الحجم تقريباً بأكمله قرب السطح .

لا نستقبل الاشارة نفسها ، بل نستقبلها مضافاً اليها الضجيج . يطلق على الضجيج الذي يعتبره شانون اسم ضجيج غاوس الابيض . تمكس كلمة الابيض حقيقة احتواء الضجيج على كل التواترات على قدم المساواة ، ونفرض ان الضجيج يحتوي على التواترات حتى حد اعلى ( س ) ه ف ث ولا يحتوي تواتر اكبر من هذا الحد . اما كلمة غاوس فتشير الى قانون احتمال عينات ذات ساعات مختلفة ، وهو قانون يصلح لعدة مصادر طبيعية للضجيج . تعتبر كل عينة من أصل هذا الضجيج الغاوسي ذي الـ ٢ س عينة الممثلة له ، غير مرتبطة بسواها ومستقلة عنه . اذا عرفنا القدرة المتوسطة للعينات والتي ترمز لها ن ، فإن معرفة قدرات بعض العينات لا يسمح بمعرفة قدرات العينات الأخرى . ستكون في هذه

الحالة القدرة الكلية لعدد من العينات يساوي  $2$  س ز هي  $2$  س ز ن إذا كان العدد  $2$  س ز كبيراً وستكون القدرة هي نفسها تقريباً لأي متتالية من عينات الضجيج تضاف إلى عينات الإشارة .

رأينا أن متتالية معينة من عينات الإشارة يمكن تمثيلها بنقطة في الفراغ المتعدد الأبعاد تبعد  $\sqrt{2}$  س ز ق عن مبدأ الاحداثيات . أما النقطة المقابلة لمجموع الإشارة والضجيج فتتمثل بنقطة أبعد قليلاً عن تلك الممثلة للإشارة . نرى في الواقع أن البعد بين النقطة الممثلة للإشارة والنقطة الممثلة لمجموع الإشارة والضجيج هو  $\sqrt{2}$  س ز ن وهكذا تقع النقطة الممثلة لمجموع الإشارة والضجيج في كرة صغيرة متعددة الأبعاد مركزها النقطة الممثلة للإشارة ونصف قطرها  $\sqrt{2}$  س ز ن .

إننا لا نتلقى الإشارة فقط ، فنحن نتلقى إشارة قدرتها الوسطية ق لكل عينة مع ضجيج غاوسي قدرته الوسطية ن لكل عينة . وتكون القدرة الكلية المستقبلية خلال فترة زمنية مقدارها ز :  $2$  س ز ( ق + ن ) . وتقع النقطة الممثلة لمجموع الضجيج والإشارة في كرة متعددة الأبعاد نصف قطرها  $\sqrt{2}$  س ز ( ق + ن ) .

بعد استقبالننا للإشارة والضجيج خلال ز ثانية نستطيع إيجاد النقطة الممثلة للإشارة والضجيج . ولكن كيف نستطيع ترشيح الإشارة والحصول عليها على حدة ، كل ما نعلمه أن الإشارة تقع على بعد  $\sqrt{2}$  س ز ن من النقطة الممثلة لمجموع الإشارة والضجيج .

كيف نتأكد من استنتاج أي الإشارات هي التي أرسلت ؟ نفرض أننا نضع داخل الكرة متعددة الأبعاد ذات نصف القطر  $\sqrt{2}$  س ز ( ق + ن ) عدداً كبيراً من كرات صغيرة متعددة الأبعاد وغير متداخلة مع بعضها وذات انصاف أقطار أكبر بقليل من  $\sqrt{2}$  س ز ن . نكتفي بعد ذلك بإرسال الإشارات الممثلة بمراكز هذه الكرات الصغيرة .

عندما نستقبل عدداً من العينات ٢ س ز من أي من هذه الاشارات مضافاً اليها عينات الضجيج ، فان النقطة المقابلة في الفراغ المتعدد الابعاد ستقع داخل الكرة المتعددة الابعاد الصغيرة المعنية المحيطة بالنقطة الممثلة للاشارة المعتبرة وليس ضمن أي كرة أخرى . وسبب ذلك ، أنه كما رأينا في حالة سلاسل العينات الطويلة المنتجة من قبل مصدر ضجيج مستقر ، تقع النقطة الممثلة لهذه العينات تقريباً على سطح كرة نصف قطرها  $\sqrt{2} \text{ س ز ن}$  . وهكذا يمكن تمييز الاشارة المرسله ودون خطأ رغم الضجيج .

ما هو عدد الكرات المتعددة الابعاد وغير المتداخلة ذات انصاف الاقطار  $\sqrt{2} \text{ س ز ن}$  التي يمكن وضعها داخل كرة نصف قطرها :  $\sqrt{2} \text{ س ز ( ن + ق )}$  . ان هذا العدد لا يمكن أن يتجاوز بحال من الاجوال نسبة حجم الكرة الكبيرة الى احدى الكرات الصغيرة .

تحدد ابعاد الفراغ المعتبر بعدد عينات الاشارة والضجيج ٢ س ز . يتناسب حجم كرة في فراغ متعدد الابعاد مع  $\text{ر}^{\text{ن}}$  ، حيث  $\text{ر}$  هو نصف قطر الكرة و  $\text{ن}$  ابعاد الفراغ . وهكذا تكون نسبة الكرتين المذكورتين :

$$\left( \frac{\sqrt{2} \text{ س ز ( ن + ق )}}{\sqrt{2} \text{ س ز ن}} \right)^{2 \text{ س ز}} = \left( \frac{\text{ق} + \text{ن}}{\text{ن}} \right)^{2 \text{ س ز}}$$

يشكل هذا العدد حداً لعدد الرسائل المختلفة التي يمكن أن نبثها خلال الفترة الزمنية ز . اما لو غاريتم هذا العدد فهو عدد واحداث البيت التي يمكن أن نرسلها :

$$\text{س.ز. لع.} \left( \frac{\text{ق} + \text{ن}}{\text{ن}} \right)^{2 \text{ س ز}}$$

يساوي التالي عدد واخداث البيت في كل ثانية

$$ص = نس ( ١ + \frac{ق}{ن} )$$

يتيح لنا وصولنا الى هذه المرحلة ، ملاحظة ان نسبة متوسط القدرة لكل عينة من الاشارة الى متوسط القدرة لكل عينة من الضجيج يجب ان تساوي نسبة الطاقة الوسطية للاشارة الى الطاقة الوسطية للضجيج ، وهذه النسبة الاخيرة تساوي النسبة  $\frac{ق}{ن}$  الواردة في العلاقة الاخيرة .

بينت المناقشة السابقة انه لا يمكن ارسال اكثر من ص بيت في كل ثانية في حالة حزام عرضه ( س ) ه ف ث وباستخدام اشارة طاقتها ق ممزوجة بضجيج طاقته ن . ذهب شاتون ابعاد من ذلك مستخدماً حقيقة ان حجم الكرة المتعددة الابعاد محتوى باكملة تقريباً قرب السطح ومبيناً بالتالي ان سرعة اصدار الاشارات تقترب من القيمة ص في العلاقة السابقة بقدر ما نريد وبعدد صغير من الاخطاء وفق ما نرغب . وهكذا فالقيمة ص في العلاقة الاخيرة هي سعة القناة في حالة قناة مستمرة اضيف ضجيج غاوسي الى الاشارة عبرها .

سنعمد الى مقارنة العلاقة الاخيرة مع علاقات سرعة الارسال والمعلومات التي اقترحها نيكويست وهارتلي عام ١٩٢٨ والتي شرحناها في الفصل الثاني . يذهب نيكويست وهارتلي الى ان عدد الارقام الثنائية التي يمكن ارسالها في كل ثانية هو : ل لع م ، حيث م هو عدد الرموز المختلفة ، ول هو عدد الرموز المرسل في كل ثانية .

ان احد انواع الرموز التي يمكننا ان نعتبرها هو قيم معينة للكمون الكهربائي :  $٣ + ١ - ١ - ٣$  . لقد كان نيكويست على علم ، مثلنا نحن الآن ، بأن عدد العينات المستقلة او قيم الكمون التي يمكن

ارسالها في كل ثانية هو ٢ س ، باستخدام هذه الحقيقة يمكننا اعادة كتابة العلاقة الاخيرة على الشكل :

$$\text{ص} = \frac{\frac{ق}{ن} + 1}{\sqrt{\frac{ق}{ن} + 1}} \text{ لع } \frac{ل}{٢}$$

اننا هنا نعيد تقفي آثار الخطوات التي قادتنا الى ص ، وقد وصلنا في العلاقة المعبرة عنها الى العدد الوسطى م للرموز المختلفة التي يمكننا ارسالها بكل عينة ، وذلك بدلالة نسبة طاقة الاشارة الى طاقة الضجيج . اذا نقصت طاقة الاشارة او زادت بالمقابل طاقة الضجيج بحيث قربت النسبة  $\frac{ق}{ن}$  من الصفر ، فان القيمة المتوسطة لعدد الرموز المختلفة التي يمكننا ارسالها في كل عينة تقترب أيضاً من الصفر ، لان لع ١ = ٠ ، ويستتبع ذلك أن سعة القناة ص في هذه الحالة تقترب من الصفر أيضاً ، وعلى العكس تزداد بشكل مطرد القيمة المتوسطة المشار اليها وسعة القناة اذا زدنا النسبة  $\frac{ق}{ن}$  اي نسبة طاقة الاشارة الى طاقة الضجيج .

لقد تعاضم فهمنا الكيفية ارسال عدد متوسط كبير من الرموز المستقلة بكل عينة بأكثر مما علمنا نيكويست أو هارتلي . نحن نعرف الآن أن تنفيذ ذلك بشكل فعال يقتضي بشكل عام "الا" نحاول اجراء عملية الترميز لرمز واحد كعينة كمن كهربائي محددة ومعدة للارسال بذاتها . على العكس يجب علينا على الدوام اللجوء الى ترميز التراكيب بحيث ترمز سلسلة طويلة من الرموز باستخدام مجموعة كبيرة متتالية من العينات . وهكذا اذا كانت نسبة طاقة الاشارة الى طاقة الضجيج هي ٢٤ ، نستطيع ارسال عدد من الرموز المختلفة بكل عينة مساوياً  $\sqrt{24 + 1} = \sqrt{25} = ٥$  بشكل وسطي ، "الا" أننا لا نستطيع ارسال ٥ رموز مختلفة بواسطة عينة محددة .



أوضحنا في الشكل ٨ - ١ من الفصل الثامن كيفية إرسال الأرقام الثنائية بمعدل رقم واحد عند كل لحظة وبوجود الضجيج وذلك باستخدام إشارة موجبة أو سالبة ذات سعة معينة ، اصطلاحنا على ربطها بالرقم ١ إذا كان مجموع الإشارة والضجيج موجبا ، وربطها بالرقم ٠ إذا كان هذا المجموع سالياً . نفرض أننا نستطيع تقوية الإشارة بمقدار كافٍ بالمقارنة مع الضجيج الذي نفرضه غاوسي ، بحيث تكون نسبة الأرقام المستقبلية الخاطئة  $\frac{1}{10000}$  . تشير الحسابات إلى أن ذلك يستدعي ستة

أضعاف طاقة الإشارة مع الحفاظ على نفس عرض الحزام وطاقة الضجيج . تنجم حاجتنا للطاقة الإضافية من أننا نستخدم لتمثيل الإشارة نبضة قصيرة إما موجبة أو سالبة مقابلة لرقم ثنائي واحد ولا نستخدم إحدى الإشارات الطويلة المؤلف من عدة عينات مختلفة ذات ساعات متباينة مقابلة لعدة أرقام ثنائية متتالية .

أما في حالة طاقة وسطية منخفضة للإشارة وطاقة عالية للضجيج ، فإن إحدى الطرق الخاصة لتحقيق سرعة مثالية في الإرسال أو الوصول إلى سعة القناة ، تتجسد بتركيز طاقة الإشارة في نبضة قصيرة وقوية وإرسال تلك النبضة في إحدى اللحظات الزمنية التي تمثل منها رمزا مختلفا . نستطيع في هذه الحالة الخاصة وغير العادية أن نرسل وبشكل فعال الرموز بمعدل رمز عند كل لحظة .

إذا رغبنا تحقيق حد شانون من أجل عرض حزام معين ، فيجب أن تكون عناصر الترميز إشارات موجبة معقدة طويلة أشبه بالضجيج الفأوسي .

نستطيع أن نغير نظرتنا إزاء لعلاقة الأخيرة التي أعطينا قيمة ص ، فبدلاً من أن نتناولها من المنظور الضيق الذي تقدمه إلينا من خلاله عدد واحدات البيت في الثانية التي يمكننا إرسالها عبر قناة اتصال معينة ،

نترجمها وفق منظور آخر نطلعنا بموجبه عن امكانيات ارسال اشارة ذات عرض حزام معين وقيمة مطلوبة للنسبة  $\frac{ق}{ن}$  أي نسبة طاقة الاشارة الى طاقة الضجيج عبر قناة ارسال معينة لها بالمقابل عرض حزام ونسبة مختلفين . نفرض مثلاً أن نسبة  $\frac{ق}{ن}$  هي ١٠٠٠ ، وعرض الحزام ٤ مليون هزة في الثانية ، عندها تكون سعة القنال ص :

$$ص = ٤٠٠٠٠٠٠٠ \text{ بيت في الثانية}$$

يمكن ان نصل الى نفس سعة القنال هذه ، بقيم مختلفة للنسبة وعرض الحزام وفق الجدول المثالي التالي :

النسبة $\frac{ق}{ن}$	عرض الحزام س
١٠٠٠	٤٠٠٠ ٠٠٠
٣٠٠٦	٨٠٠٠ ٠٠٠
١٠٠٠ ٠٠٠	٢٠٠٠ ٠٠٠

يوضح هذا الجدول انه لتحقيق سعة قناة معينة اما ان نستخدم حزام اعرض ونسبة اخفض ، او نستخدم حزام أضيق ونسبة اكبر .

أدهشت العاملين الاوائل في نظرية المعلومات فكرة تخفيض عرض الحزام في مقابل زيادة الطاقة المستخدمة ، اذ أن هذا يستدعي كمية كبيرة من الطاقة . اثبتت الخبرة انه من المفيد والعملي ان نزيد عرض الحزام بحيث نحصل على قيمة جيدة لنسبة الطاقة الى الضجيج باستخدام طاقة اقل مما قد يلزم في احوال اخرى .

ان هذا هو ما يتم فعله ، على سبيل المثال ، في ارسال التواتر المعدل ففي هذا المثال تعتبر سعة معينة للاشارة التي سترسل ، كالوسيقى مثلاً

وترمز كاشارة راديو ذات تواتر معين . يؤدي ازدياد وتقصان سعة الاشارة المرسلة الى تغير كبير جدا في تواتر الاشارة المعدلة الممثلة لها وهكذا فبارسائل اشارة موسيقية عرض حزامها ١٥٠.١٠ هـفت ان استخدام ارسال التواتر المعدل لحزام اكثر عرضا من الموسيقى التي يمثلها ، يفضي الى نتيجة مفادها ان نسبة الاشارة الى الضجيج في الموسيقى المستقبل ستكون اكبر بكثير من نسبة طاقة الاشارة الى طاقة الضجيج في الاشارة ذات التواتر المعدل التي تصل الراديو ان طريقة تعديل التواتر لا تشكل نظاما فعالا نموذجياً ، اذ انها لا تستجيب للتحسينات التي تضيفها العلاقة الاخيرة لسعة القناة ص .

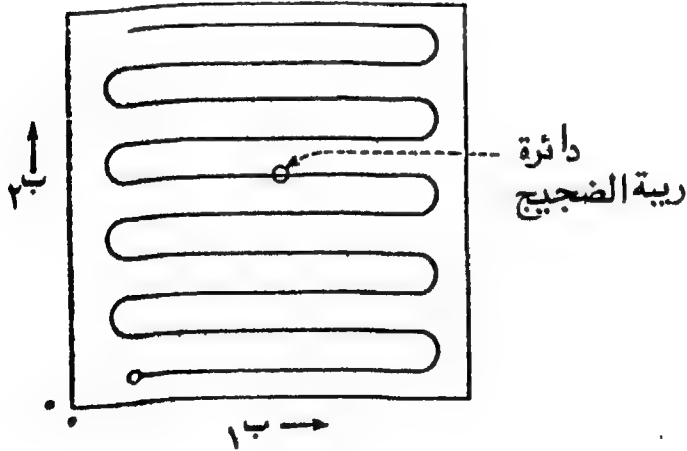
يتابع عباقرة الاتصالات وبشكل مستمر اختراع انظمة تعديل محسنة وقد اقترح علي بعضهم واكثر من مرة انظمة جديدة تحقق ما هو افضل من علاقة سعة القناة ص الاخيرة ، ووفق ما تسمح به السعة المثالية للقناة . كانت كل الاقتراحات معقولة من حيث المبدأ ، الا انني كنت اعلم ان شيئاً ما غير صحيح ، تماماً كما في حالة الآلات الدائمة الحركة . لقد اظهر التحليل المتاني مكانن الخطأ . وهكذا تطلعنا نظرية الاتصالات على ما لا يمكن انجازها وتقتصر الممكن كذلك .

الا ان هناك شيئاً واحداً لا يمكن تحقيقه فيما يتعلق بتحسين نسبة الاشارة الى الضجيج خاصة اذا زدنا عرض الحزام ، اما هذا المستحيل فهو ان نحقق نظاماً بإمكانة التصرف بشكل منتظم ومتجاوب لكل القيم المختلفة لنسبة طاقة الاشارة الى طاقة الضجيج .

ربطنا في مطلع هذا الفصل الاشارة بنقطة في فراغ متعدد الابعاد حيث يساوي عدد هذه الابعاد عدد العينات المعتبرة . ان ارسال اشارة ذات حزام ضيق فيها عدة عينات باستخدام اشارة ذات حزام عريض فيها عدد اكبر من العينات يعني ان ننفذ عملية ارتسام من نقاط فراغ متعدد الابعاد الى نقاط في فراغ آخر متعدد الابعاد ذي عدد اكبر من الابعاد وان يكون هذا الارتسام من نوع واحد - لواحد .

برهنا في الفصل الاول نظرية تتعلق برتسام نقاط من فراغ ثنائي الابعاد (مستوي) الى نقاط من فراغ احادي الابعاد (مستقيم) . وذكرنا في ذاك المعرض اننا اذا نفذنا ارتسام كل نقطة من المستوى الى نقطة وحيدة مقابلة على المستقيم ، فان الارتسام لا يمكن ان يكون مستمرا ، ومعنى ذلك اننا اذا تحركنا بشكل مستمر وناعم عبر مسار في المستوى من نقطة الى نقطة مجاورة ، فان المرسم المقابل على المستقيم سيتحدد بقفزات الامام والخلف . تنطبق هذه النظرية حرفاً بحرف على كل الارتسامات من نقاط فراغ الى نقاط فراغ آخر مختلف الابعاد . يمكن لهذه الحقائق ان تعطي كل المتاعب في انظمة الارسال حيث يمثل عدد قليل من عينات الرسالة بعدد اكبر من عينات الاشارة .

يعطي شاتون مثالا بسيطا على هذا النوع من المتاعب والموضع في الشكل ٩ - ٣ .



الشكل ٩ - ٣

نعرض اننا نستخدم عينتين من السعات : ب<sub>١</sub> ، ب<sub>٢</sub> لتمثيل سعة وحيدة ح . نعتبر ان الكميتين ب<sub>١</sub> ، ب<sub>٢</sub> كاحداثيتين كما هو موضح

نرسم داخل المربع خطاً متلوياً يبدأ بقرب الزاوية السفلى اليسارية ويندرج في الصعود نحو الأعلى . نستخدم على أن البعد مقاساً على هذا الخط هو ح كمون أو سعة الإشارة التي سترسل ، على أن يجري القياس بدءاً من أول الخط وحتى نقطة معينة منه .

تقابل أي قيمة معينة لـ ح قيمتين ب<sub>١</sub> ، ب<sub>٢</sub> . نلاحظ أن مجال ب<sub>١</sub> و ب<sub>٢</sub> أصغر من مجال ح . نستطيع أن نرسل ب<sub>١</sub> ، ب<sub>٢</sub> ، ثم نستعيد بدقة بالغة ، أو لا نستطيع ذلك ؟

نفرض أن قليلاً من الضجيج قد تسرب إلى ب<sub>١</sub> و ب<sub>٢</sub> ، بحيث أننا إذا أردنا تحديد ح عند المستقبل فسنجد أنفسنا في دائرة من الريبة بسبب الضجيج إذا كان قطر الدائرة أقل من البعد بين لغات المسار المنحني نستطيع تحديد القيمة الصحيحة لـ ح بخطاً أقل بكثير من الخطأ في كل من ب<sub>١</sub> ، ب<sub>٢</sub> ، أما إذا كان الضجيج أكبر ، عندها لن نستطيع التأكد من لغة المنحني التي تقع عليها ح ، وبدا سنرتكب خطأ أكبر في تقدير ح .

يبدو أنه لا مفر من هذا السلوك في الأنظمة المشابهة لنظام تعديل التواترات حيث يستخدم حزام عريض بهدف الحصول على قيمة أجود لنسبة الإشارة إلى الضجيج .

عندما يزداد الضجيج المضاف إلى الإرسال ، يزيد بدوره وبشكل تدريجي الضجيج في الإشارة المستقبلية ، إلا أنه لا يلبث أن يزيد على قفزات وبشكل كارثي . يقال عند هذه النسبة للإشارة إلى الضجيج أن نظام الإرسال قد انكسر . وهنا نحن أمام مثال تطلعنا من خلاله نظرية رياضية مجردة أن هناك سلوكاً معيناً لا يمكن تحاشيه في أنظمة الاتصالات الكهربائية بصورة عامة .

لقد كان التناول في هذا الفصل هندسياً بشكل أساسي . وهذه هي إحدى طرق معالجة الإشارات المستمرة ، وفي الواقع يعطي شاتون في كتابه عن نظرية الاتصالات طريقة أخرى قليلة التطبيق لكل أنواع

الاشارات والضجيج وتبقى للطريقة الهندسية أهمية خاصة ، اذ تثبت هذه الطريقة انها مثمرة وفعالة في عدة مسائل ذات صلة بالاشارات الكهربائية التي ليست من صلب نظرية الاتصالات .

وصلنا هنا الى هندسة للاشارات المحدودة الحزام بانتقاء عينات الاشارات ومن ثم اعتبار سمات العينات كاحداثيات نقطة في فراغ متعدد الابعاد . الا انه من الممكن ان نصب الاشارات محدودة الحزام في قالب هندسي دون اللجوء الى العينات ، وقد حقق ذلك فعلا الرياضيون المهتمون بمسائل ارسال الاشارات . لقد اصبح من المعتاد تمثيل الاشارات المحدودة الحزام كنقاط في فراغ اشارات متعدد الابعاد او فراغ توابع ومن ثم برهان النظريات المتعلقة بالاشارات بتطبيق اساليب الهندسة . ان للتمثيل الاخير أهمية كبرى اذ يمكن الرياضيين من استنباط وصياغة قضايا صحيحة تغطي كل الاشارات المحدودة الحزام او كل صنف الاشارات المحدودة الحزام ، دون اعتبار التفاصيل المضللة لاشارات معينة ، تماماً كما يفعل الرياضيون لدى صياغتهم قضايا صحيحة عن كل المثلثات او كل المثلثات القائمة . ان فراغ الاشارات هو أداة قوية بين ايدينا ، او بالاحرى بين عقول الرياضيين المبدعين ، وكل ما نستطيعه ان نعجب ونتعجب .

كانت مهمتنا الرئيسية في هذا الفصل ، من وجهة نظر نظرية الاتصالات ، ان نبرهن نظرية تتعلق بقناة مستمرة ذات ضجيج . لقد تضمنت العلاقة الاخيرة لسعة القناة ص هذه النظرية ، حيث اعطت العلاقة المذكورة السرعة التي يمكننا وفقها ارسال الارقام الثنائية باقل ما يمكن من الاخطاء عبر قناة مستمرة حيث تمزج اشارة عرض حزامها س وطاقتها ق مع ضجيج غاوسي ابيض عرض حزامه س وطاقته ن .

كان نيكويست منذ عام ١٩٢٨ على علم بإمكانية ارسال عدد مستقل من الرموز مساو لـ ٢ س في كل ثانية عبر قناة عرض حزامها ٢ س ، الا انه كان يجهل عدد الرموز المختلفة التي يمكن ارسالها في كل ثانية من اجل نسبة معينة لطاقة الاشارة الى طاقة الضجيج . اما نحن فقد

حسبنا ذلك العدد لحالة معينة وشائعة من الضجيج ، وكذلك استطعنا ان نعرف ان امكان ارسال عدد وسطي من الرموز م لكل عينة في الثانية لا يعني نجاح المحاولة بترميز الرموز المتتالية بشكل مستقل ككمونات محددة ، على العكس يجب ان نستخدم ترميز التراكيب ، حيث يتم ترميز عدد كبير من الرموز المتتالية دفعة واحدة .

تؤكد علاقة سعة القناة ص امكانية استخدام اشارة ذات حزام عريض ونسبة ضئيلة للاشارة الى الضجيج لتحقيق بث رسالة ذات حزام ضيق ونسبة عالية للاشارة الى الضجيج ، وابرع مثالي عملي على ذلك هو تعديل التواتر . سنعود الى متابعة هذه الاعتبارات في الفصل العاشر .

كان لهذا الفصل جانب آخر ، فقد اوضحنا فيه استخدام افكار جديدة وتطبيق اداة رياضية قوية في حقل نظرية الاتصالات . لقد حققنا علاقة سعة القناة ص بتطبيق حيلة بارعة وغامضة الى حد ما هي تمثيل الاشارات الكهربائية الطويلة والضجيج المضاف اليها بنقاط في فراغ متعدد الابعاد . واصطلحنا على ان يكون مربع بعد النقطة عن مبدأ الاحداثيات في الفراغ المتعدد الابعاد هو طاقة الاشارة التي تمثلها النقطة .

وهكذا اخترلنا مسألة في نظرية الاتصالات الى مسألة مقابلة في الهندسة ، ووصلنا الى النتائج المرجوة بمناقشات هندسية محضة . ولعلنا نلاحظ ان التمثيل الهندسي للاشارات قد اضحى اداة رياضية فعالة في دراسة الاتصالات وخصائص الاشارات .

ان اختزال مسائل الاشارات الى الهندسة هو عمل مهم بعد ذاته وهو مثال حي عن قيمة البحث عن وسائل رياضية متجددة تتناسب مع التعقيد المتزايد للمسائل التي يطرحها تطور التكنولوجيا المتصاعد . وكل ما نامله ان نطبق هذا النظام في التفكير على كل المشاكل المتزايدة في الصعد الهندسية المختلفة .





## الفصل العاشر

### نظرية المعلومات والفيزياء

قدمت في الفصل الثاني لمحة تاريخية عن نظرية الاتصالات ،  
وأوضحت حينئذ أن هذه النظرية وليدة الاتصالات الكهربائية ، وكما  
نعلم فإن دراسة التيارات الكهربائية والمجالات الكهرومغناطيسية تقع في القلب  
من الفيزياء الحديثة .

لم تكن الكهرباء لتقدم كوسيلة للاتصالات بالنسبة لمورس ومعاصريه  
إلا إمكانيات محدودة بالمقارنة مع الصوت الانساني أو الكتابة . لقد  
كان على هؤلاء الباحثين أن يصمموا طرقاً للترميز يمكن بواسطتها تمثيل  
الحروف الأبجدية بسلسلة من نبضات القطع والوصل الكهربائية . وقد  
قادت مسألة ترميز الرسائل بشكلها العام إلى الأفكار المحدثة حول  
موضوع الترميز . وطالما أن القضية برمتها تنحصر في البحث عن وسيلة  
للترميز باستخدام التيار الكهربائي ، فهذا نحن الآن أمام علاقة نوعية بين  
الترميز وظاهرة فيزيائية محددة . اننا أمام رابطة تضم نظرية الاتصالات  
والفيزياء .

وقد رأينا أيضاً أن الإشارات التي نرسلها عبر الأسلاك أو بواسطة  
الراديو ستصل ممزوجة ببعض التشويشات التي أطلقنا عليها اسم  
الضجيج . وهذا أمر يمكن تحاشيه إلى حد ما ، إذ يمكن تخفيض الضجيج  
الذي يصل إلى أجهزة الاستقبال بتبني تصميم مناسب وابتكار  
اختراعات جديدة . ففي حالة استقبال إشارات الراديو نستخدم

هوائياً يتلقى الاشارات بشكل فعال من اتجاه ارسال المصدر ويكون اقل حساسية للاشارات القادمة من اتجاهات أخرى ، كما نستطيع التأكد من ان جهاز الاستقبال لدينا يتجاوب مع التواترات التي نرغب باستخدامها ولا يابه للاشارات المتداخلة ولا للضجيج من تواترات أخرى .

وعلى الرغم من كل هذه الاجراءات ، فسيبقى هناك حد ادنى من الضجيج ممزوج مع الاشارة التي نستقبلها ، وقد يتأثر بعض هذا الضجيج من أجهزة اقلاع السيارات او مصادر طبيعية كالبرق والصواعق وحتى في حالة غياب البرق والصواعق فسيستمر الضجيج طالما بقيت حرارة في الكون . لاحظ براون ، وهو بيولوجي بريطاني ، منذ سنين عديدة ، كيف ان حبات غبار الطلع المعلقة في سائل ما تتحرك بشكل عشوائي عندما ننظر اليه في المجهر ، فبعضها يتحرك جيئة والآخر ذهابا وبعضها يتسارع ، وعلى العكس يتباطأ البعض الآخر ، دعي هذا الطراز من الحركة بالحركة البروانية ، وتنتج هذه الحركة بشكل أساسي من ارتطام الدرات والجزيئات ببعضها . . كان الانجاز العلمي المبكر لاینشتاین هو ابداع نموذج رياضي للحركة البروانية .

كان من الممكن لحبات غبار الطلع التي شاهدها براون ان تبقى ساكنة لو كانت الجزيئات المحيطة بها ساكنة ، الا ان جزيئات السائل نفسها في حركة دائمة ، وهذه الحركة بحد ذاتها هي التي تتمخض عن ظاهرة الحرارة . تتحرك جزيئات الغازات بشكل غير منتظم وبسرعة او ببطء اثناء الفترات الزمنية الفاصلة بين اصطداماتها مع جزيئات أخرى ، اما في السوائل فتحتشد الجزيئات وتندافع عن قرب مغيرة امكنتها بشكل مستمر وبسرعة او ببطء ايضاً . يختلف الامر في الاجسام الصلبة حيث تهتز الدرات وتراوح حول مواقع سكونها النسبية ، تارة بسعات عالية واخرى بسعات منخفضة الا انها لا تغادر مواقعها بالنسبة للجوار اطلاقاً وهكذا تتحرك الجزيئات على الدوام سواء في الغازات او في السوائل او في الجوامد ، وتناسب حركاتها مع وسطي طاقاتها التي تتوقف بدورها على درجة حرارة تلك الاجسام بالنسبة للصفر المطلق ( - ۲۷۳ درجة

مشوية تقريبا ) ، وتختلف اتجاهات وسعات تلك الحركات باختلاف الطاقة والسرعة من جزئي لجزئي .

لا تقتصر الطاقة في كوننا على الطاقة الميكانيكية فقط ، اذ تمتلك الامواج الكهروطيسية طاقة ايضا ، وتتولد هذه الامواج عن التيارات الكهربائية المتغيرة . تتكون الذرات من نوى موجبة تدور حولها إلكترونات سالبة ، بينما تتركب الجزيئات من ذرات . عندما تهتز جزيئات مادة ما بسبب الطاقة الحرارية ، تولد الحركات النسبية لمكونات تلك الجزيئات امواجاً كهروطيسية ، وتنطوي تلك الامواج على تواترات من بينها ما ندعوه بتواترات امواج الراديو ومنها الحرارة والضوء . يقال ان الجسم الحار يشع امواجاً كهروطيسية ، وتسمى تلك الامواج اشعاعاً .

ان معدل ما يصدره الجسم ، المحفوظ في درجة حرارة معينة ، من طاقة محمولة على امواج راديوية او حرارية او ضوئية تختلف باختلاف مادة الجسم فالاجسام القاتمة تصدر من الاشعاع كمية اكبر مما تصدره الاجسام اللامعة . وهكذا فالفضة ، المعروفة بلمعاتها لانها تعكس امواج الراديو والحرارة والضوء الساقطة عليها ، هي في واقع الامر مادة قليلة الاشعاع ، في حين ان هباء الفحم للحجر الاسود اكثر اشعاعاً من الفضة . عندما يسقط الاشعاع على مادة ما ، فان الاشعاع المنعكس ، لا الاشعاع الممتص عموماً ، يختلف باختلاف تواتر الاشعاع الوارد ، من امواج الراديو الى الامواج الضوئية مثلاً . الا ان هناك قاعدة عامة تحكم كمية الاشعاع من تواتر معين ، فكمية الاشعاع الصادرة عن مادة ما في درجة حرارة معينة تتناسب مع النسبة من الاشعاع التي يمتصها الجسم عند سقوط هذا الاشعاع عليه . وهكذا فكانما هناك طبقة اشبه بالجلد حول كل مادة تسمح لكمية من الاشعاع الساقط بالعبور وتعكس الباقي ، ويبدو ان نسبة الاشعة التي تعبر تلك الطبقة الجلدية هي نفسها سواء كلفت الاشعة واردة على المادة او خارجة منها ولو لم يكن الامر كذلك لاستطعنا ان نتوقع ظاهرة غريبة وغير طبيعية ( تناقض ما نعرفه من قوانين الطبيعة ) . لنتخيل علبة محكمة الغلق

او فرنا في درجة حرارة ثابتة ، واننا كنا قد علقنا جسمين داخل هذا الفرن ، ولنفرض ( خلافا للواقع ) ان احد هذين الجسمين عاكس جيد للاشعاع وماص رديء له وانه في الوقت نفسه مصدر جيد للاشعاع ، اما الجسم الثاني فنفترض انه ماص جيد للاشعاع وعاكس رديء له وانه اخيرا مصدر سيء للاشعاع . لننتصور ان الجسمين كانا في لحظة معينة في درجة حرارة واحدة . ان الجسم الاول سيمتص من الاشعاع اقل مما يصدر وذلك بعكس ما يفعل الجسم الثاني الذي يمتص اكثر مما يصدر . فلو جرت الامور على هذا النحو فان الجسم الثاني سيسخن اكثر من الجسم الاول . ليس هذا هو واقع الامور ، فكل الاجسام الحبيسة داخل علب او افران مغلقة ذات درجات حرارة واحدة ومنظمة اذ انها لا بد ستصل الى درجات حرارة مساوية لدرجة حرارة الهلبة او الفرن ، سواء اكانت تلك الاجسام لامعة عاكسة جيدة للاشعاع وماصة رديئة له ، او قاتمة عاكسة رديئة وماصة جيدة . ولهذا لا يمكن ان يحدث الا اذا كانت قابلية امتصاص الاشعاع لا قابلية عكسه مساوية تماما لقابلية اصداره كما هو واقع الحال في الطبيعة .

ان الامر في القرن الموحد لا يقتصر على بلوغ الاجسام الحبيسة درجة حرارة واحدة ، بل ان هناك شدة اشعاع تتميز بها مثل هذه الاوعية الموصدة . لتتخيل ان ومضة من الاشعاع السائد في هذا الموحد يسقط على احد جدرانها . ان جزءا منها سينعكس ليصبح مجرد اشعاع في اجواء الموحد ، بينما سيمتص الجدار الآخر . سيطلق الجدار بدوره كمية معينة من الاشعاع ينضم الى ما هو موجود في جو الموحد . وهكذا فهناك تبادل دائم للاشعاع بين جو الموحد وجدرانها .

اذا كان الاشعاع في الداخل ضعيفا جدا ، فإن الاشعاع الصادر من الجدران سيكون اكبر مما يرد عليها ومما تمتصه . اما اذا كان اشعاع الجو كبيرا فإن الجدران ستلتقي وتمتص من الاشعاع اكثر مما تصدر اذا تساوى الاشعاع الساقط على الجدران مع الاشعاع الصادر عنها ، قيل عن الاشعاع بانه في حالة توازن مع المادة المحيطة به . ان لهذا

الاشعاع طاقة تزداد بزيادة درجة الحرارة ، تماماً كما تزداد الطاقة الحركية لجزيئات الغاز أو السائل أو الجامد بزيادة سخونتها .

لا تتوقف شدة الاشعاع في الموصل على قابلية جدرانه لمعكس الاشعاع أو لامتنصاه ، بل تتوقف على درجة حرارة تلك الجدران فقط . اذ لو لم يكن الأمر كذلك ، وعمدنا الى صنع أنبوب قصير يصل بين جوف موصل لامع ذي جدران عاكسة ، وبين جوف موصل آخر قاتم وذو جدران ماصة ، وكان الموصلان في درجة حرارة واحدة ، لحصلنا على تدفق اشعاعي من أحد الموصدين الى الآخر عبر الأنبوب الا ان مثل هذا الأمر لا يحصل أبداً في الواقع .

نستنتج أن هناك شدة اصدار معينة للاشعاع الكهرومغناطيسي ، كالضوء والحرارة وأمواج الراديو ، مقابلة لدرجة حرارة معينة . إن الأمواج الكهرومغناطيسية تنتشر في الخلاء والهواء والمواد العازلة كالزجاج ، كما يمكن نقلها بالأسلاك . نستطيع في الواقع النظر الى إشارة مرسله عبر زوج من أسلاك الهاتف من منظورين مختلفين فالإشارة في الآلية الأولى تتألف من تيار الإلكترونات يحركها فرق الكمون ، أما في المنظور الثاني فتتكون الإشارة من حقلين ، كهربائي ومغناطيسي ، بين السلكين وحولهما يتحركان مع التيار . وكما ان بإمكاننا اعتبار الإشارات الكهربائية في الأسلاك أمواجاً كهرومغناطيسية وبما ان الأجسام الحارة تشع أمواجاً كهرومغناطيسية ، فعلينا ان نتوقع بالمقابل امكان أن تولد الحرارة إشارات كهربائية . وقد استطاع ج. ب. جونسون ، مكتشفه التقلبات الكهربائية المتسببة عن الحرارة ، توصيف تلك التقلبات لا بدلالة الأمواج الكهرومغناطيسية ، بل بدلالة تقلبات فرق الكمون بين طرفي مقاومة معينة .

واستطاع فيزيائي آخر ، إثر انتهاء جونسون من قياس تلك التقلبات ، استنباط الصيغة النظرية لها بتطبيق قواعد الميكانيك الاحصائي . لم يكن هذا الفيزيائي الا ه. نيكويست ، الذي ، وكما رأينا في الفصل الثاني ، قدم مساهمة كبيرة في إرساء قواعد نظرية المعلومات .

أما صيغة نيكويست والتي تدعى اليوم ضجيج جونسون أو الضجيج الحراري ، فتعطى على النحو التالي :

$$k = 4 \times 10^{-21} \text{ واط / د م س}$$

حيث  $k$  وسطى مربع كمون الضجيج ، أي القيمة الوسطية لمربع كمون الضجيج عبر المقاومة المعتبرة .  $k$  هو ثابت بولتزمان :

$k = 1.37 \times 10^{-23} \text{ جول / لكل درجة حرارة د درجة حرارة}$   
المقاومة مقاسة بالنسبة للصفر المطلق ، وتدعى درجة حرارة كالفن وتسوي درجة الحرارة المثوية مضافا إليها ٢٧٣ .  $k$  هي قيمة المقاومة مقاسة بالأوم . وأخيرا  $k$  هو عرض حزمة التواترات للضجيج مقاسا بالهرتز في الثانية ( هـ فـ ث ) .

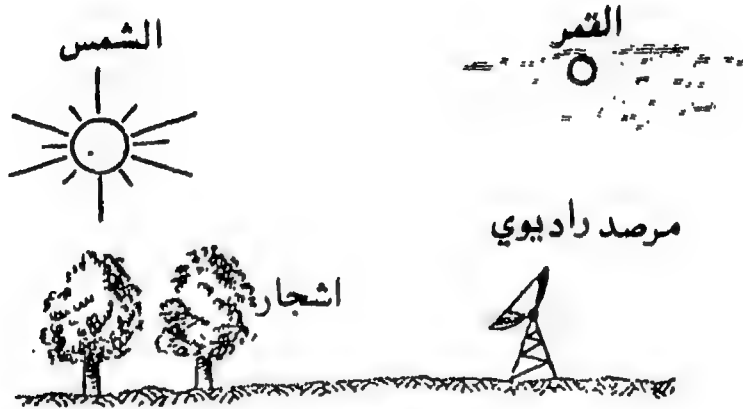
يعتمد عرض الحزمة  $k$  بالطبع على خصائص أجهزة القياس لدينا . فلو ضخمنا الضجيج باستخدام مضخم عريض الحزمة لحصلنا على ضجيج أكثر مما لو استخدمنا مضخما ضيق الحزمة وبنفس المردود . وهكذا نتوقع ضجيجا أكثر في التلفزيون لأنه يضخم الاشارات عبر حزمة يبلغ عرضها عدة ملايين من الهرتز في الثانية ، بينما يكون الضجيج أقل في الراديو لأنه يستخدم لتضخيم الاشارات حزمة ذات عرض يساوي عدة آلاف من الهرتز في الثانية .

رأينا أن المقاومة الحارة تنتج ضجيج كمون فلو ربطنا بالمقاومة الحارة مقاومة أخرى لتدفقت الطاقة الكهربائية الى هذه المقاومة ، وإذا كانت هذه المقاومة الأخيرة باردة ، فستقوم الطاقة بتسخينها . وهكذا فالمقاومة الحارة هي مصدر كموني لضجيج طاقة . ما هي القيمة العظمى لاستطاعة الضجيج التي يمكن أن تغذيها ؟ تعطى تلك القيمة بالعلاقة :

$$P = k \times T \times B$$

تعتبر هذه العلاقة ، على نحو ما ، أجود من سابقتها . إن لم يكن لسبب فلأنها تحوي عدداً أقل من الحدود ، ولم تعد قيمة المقاومة م ظاهرة فيها . كما أن صياغتها تتيح تطبيقها في حالات أخرى .

نفرض مثلاً أن لدينا مرصداً راديوياً ، وهو عاكس مكافئ كبير يقوم بتركيز أمواج الراديو على مستقبل عالي الحساسية . أوضحت مثل هذا المرصد في الشكل ١٠ - ١ . نفرض أننا نسدّد هذا المرصد إلى أجسام سماوية أو أجسام أرضية مختلفة ، بهدف تلقي الضجيج الصادر عنها بسبب سخونتها .



الشكل ١٠ - ١

نحسب طاقة الضجيج الراديوي المستقبل باستخدام العلاقة الأخيرة حيث د هي درجة حرارة الجسم الذي نوجه نحوه المرصد الراديوي .

إذا وجهنا المرصد الراديوي جهة تجمع مائي أو أرض ملساء ، فما سيشاهده المرصد في هذه الحالة هو انعكاس للسماء ، أما إذا وجهناه نحو أجسام لا تعكس الأمواج الراديوية بشكل جيد ، كالأعشاب والأشجار الورقة ، نحصل على ضجيج مقابل لدرجة حرارة ٢٩٠ كالفن أي حوالي ١٧ درجة مئوية ، وهي درجة حرارة الأشجار .

ولو وجهنا المرصد نحو القمر ، وكان المرصد محكم التسديد بحيث لا يرى الا القمر دون جواره ، إحصلنا على نفس الضجيج تقريباً وهو ليس ضجيج سطح القمر بل ضجيج ما تحت سطح القمر بعمق حوالي السنتيمتر ، ذلك لأن ملادة القمر شفافة للأمواج الراديوية نوعاً ما . نذكر هنا بأن الضجيج نلجم عن درجة الحرارة .

أما اذا سددنا المرصد نحو الشمس ، تتوقف اذ ذلك كمية الضجيج على التواتر الذي تضبط المرصد لاستقباله . فإذا كان ذلك التواتر حوالي ١٠ مليون هـ ف ث ( يقابل طول موجة ٣٠ متر نحصل ) على ضجيج يقابل درجة حرارة مساوية لليون كالفن وهي درجة حرارة الهالة الرقيقة المحيطة بالشمس ، وهذه الهالة شفافة للأمواج الراديوية القصيرة ، كالفلاف الجوي الأرضي تماماً . وهكذا اذا ضبطنا المرصد على تواتر مقداره عشرة آلاف مليون هزة في الثانية نحصل على اشعاع يقابل درجة حرارة ٨٠٠٠ كالفن ، وهي درجة الحرارة السائدة فوق سطح الشمس بقليل . أما سبب ارتفاع درجة حرارة هالة الشمس بالنسبة لما تحتها ، فهو غير معروف تماماً .

يختلف الضجيج الراديوي السنماوي باختلاف التواترات ، وعندما يصل التواتر المعتبر الى عدة آلاف ملايين الهزات في الثانية يقابل الضجيج عندئذ درجة حرارة ٣٠٠٠ كالفن أي حوالي ٢٦٩٥ مئية . أما عند التواترات الأدنى فالضجيج أكبر ويزداد باطراد كلما انخفض التواتر . تبث المجرات البعيدة على مختلف أصنافها ضجيجاً راديويًا . يحمل الاشعاع الكوني الخلفي ذو درجة الحرارة ٣٠٠ كالفن المذكورة ، تاريخ الكون بين طياته ، أما الأمواج الأخرى فلها تواترات متباينة وتأتي من أمكنة مختلفة .

ومهما يكن من امر فعلينا تقبل ضجيج جونسون أو الضجيج الحراري كحد أدنى لا سبيل للتخلص منه ، أما ما تفعله مصادر الضجيج الأخرى فهي انها تزيد الأمر سوءاً . ان الطبيعة الأساسية لضجيج جونسون جعلت منه معياراً في قياس حسن أداء أجهزة الاستقبال الراديوية .



يضيف جهاز الراديو ، كما رأينا ، ضجيجاً معيناً الى الإشارة التي يتلقاها ، وهو يضخم ايضاً أي ضجيج يصله نطرح الآن السؤال التالي : كم ضعفاً من ضجيج جونسون بدرجة حرارة مكافئة د<sub>ن</sub> نعتبرها مقياساً لضجيج جهاز الراديو ، وكلما كانت اصغر كان جهاز الراديو اجود .

نلقي فيما يلي بعض الضوء على درجة حرارة الضجيج د<sub>ن</sub> ، نتصور جهاز راديو مثالياً بدون ضجيج وله نفس المردود وعرض الحزمة كجهاز راديو فعلي ، ثم نرسل في هذا الجهاز المثالي ضجيج جونسون المقابل لدرجة الحرارة د<sub>ن</sub> بالإضافة الى الإشارة المستقبلية فيه . يترتب على ذلك ان نسبة طاقة الإشارة الى طاقة الضجيج في هذا الجهاز المثالي ، المضاف اليه ضجيج جونسون ، هي نفسها لجهاز الراديو الفعلي .

اذن فدرجة حرارة الضجيج د<sub>ن</sub> هي مقياس جيد لضجيج جهاز الراديو . يستخدم في بعض الأحيان مقياس آخر يعتمد على د<sub>ن</sub> ويدعى رقم الضجيج ، ويعطى بالعلاقة :

$$R_{ض} = \frac{293 + D_n}{293} + 1$$

حيث R<sub>ض</sub> هو رقم الضجيج المعروف .

إن تعريف رقم الضجيج هذا هو تعريف أرضي الطابع حيث تمتزج كل إشارة مع ضجيج مقابل لدرجة حرارة 293 كالفرن تقريباً . يساوي رقم الضجيج نسبة الخرج الكلي للضجيج ، بما في ذلك ضجيج جونسون المقابل لدرجة حرارة 293 كالفرن عند الدخل والضجيج المنتج من قبل الراديو ، الى ضجيج جونسون المضخم وحده .

تعتمد درجة حرارة الضجيج  $\Delta$  لجهاز راديو على طبيعة وجودة ذلك الجهاز ، أما الحد الأصغري لرقم الضجيج فيعتمد على التواتر المستعمل . يبين الجدول التالي درجات حرارة الضجيج لبعض انواع اجهزة الاستقبال .

نوع جهاز الاستقبال	درجة حرارة الضجيج - كالفن
راديو أو تلفزيون جيد	١٥٠٠
محطة استقبال ميزو لرحلات الفضاء	٢٠
جهاز استقبال مضخم	٥٠

ان درجات الحرارة الفعلية لأجهزة الاستقبال الراديوية وكذلك درجات حرارة الأجسام التي نوجه نحوها هوائيات أجهزة الراديو تلك ، هي من الأهمية بمكان في نظرية الاتصالات ، لان الضجيج يحدد الطاقة اللازمة للإرسال . ان ضجيج جونسون هو من النوع الفأوسي الذي تنطبق عليه علاقة سبق ان عرضناها : وهي :

$$ص = س \text{ لع } ( ١ + \frac{ق}{ن} )$$

أي لإرسال ص بيت في كل ثانية يجب ان توفر للإشارة استطاعة ق ترتبط مع استطاعة الضجيج ن بهذه العلاقة . فإذا اعتمدنا الضجيج ن من العلاقة الثانية في هذا الفصل :  $ن = ث د س$  نحصل على :

$$ص = س \text{ لع } ( ١ + \frac{ق}{ث د س} )$$

نفرض استطاعة للإشارة ق معطاة . اذا صغرنا س تصغر ص بالمقابل ، اما اذا كبرنا س ، فإن ص لن تكبر الى ما لا نهاية ، بل ستكبر

مقتربة على الدوام من حد معين . وعندما يصبح الكسر  $\frac{ق}{ث د س}$  صغيراً جداً بالمقارنة مع الواحد نحصل على :

$$\frac{١٠٤٤ ق}{ث د} = ص$$

$$اي أن ق = ٠.٦٩٣ . ث د ص$$

تؤكد هذه العلاقة الأخيرة أنه حتى لو استخدمنا حزمة عريضة جداً فإننا سنحتاج على الأقل لطاقة قيمتها ٠.٦٩٣ . ث د جول في كل ثانية لإرسال بيت في كل ثانية ، أي أننا يجب أن نستخدم بشكل وسطي طاقة مساوية ٠.٦٩٣ . ث د جول لكل بيت من المعلومات نود إرسالها . يجب أن نتذكر أن استنتاجنا لهذه العلاقة انطلق من فرض مثالي مفاده أن علينا اعتماد طريقة للترميز تضم عدداً كبيراً من الأحرف الممثلة لكم معلوماتي غزير ثم ترمزها وفق إشارة مديدة . تحتاج معظم أنظمة الاتصالات الفعلية كمية أكبر من الطاقة لكل بيت من المعلومات ، كما لاحظنا في الفصل التاسع .

ولكن ألم ننس شيئاً ما ؟ ماذا عن الآثار الكوانتية . ربما أنها ليست ذات أهمية في الراديو ، ولكنها مهمة بشكل مؤكد في الاتصالات الضوئية ، وقد انفتحت أمام الضوء مجالات تطبيقية واسعة . تنقل الألياف البصرية الدقيقة الأصوات ومختلف الحمولات الأخرى كما تتيح ومضات الضوء المنعكسة عن المرايا القمرية متابعة تغيرات بعد القمر عن الأرض بخطأ مقداره ١ . سنتمترات ، وكان رواد الفضاء قد تركوا تلك المرايا على سطح القمر في رحلاتهم القمرية المتتالية .

كان هاري نيكويست رجلاً مستقبلياً . لقد صاغ ضجيج جونسون لعرض حزام قدره س وفق العلاقة :

$$\frac{b \times c \times s}{\frac{b \times c}{d}} = n$$

$$1 - e$$

ومن ميزات هذه العلاقة إمكان تطبيقها على كل التواترات بما في ذلك الضوء . اما الكميات الواردة فيها فهي :

ن : طاقة الضجيج . ت : التواتر مقدر ب هـ ف ث

ب : ثابت بلانك ويساوي  $6.63 \times 10^{-34}$  جول . ثانية

نربط عادة بين ثابت بلانك مع طاقة فوتون واحد للضوء بالعلاقة :

$$\text{طاقة الفوتون} = b \times c$$

ث : ثابت بولتزمان . د : درجة الحرارة مقدرة بمقياس كالفن .

س : عرض حزمة التواترات .

تصبح الآثار الكوانتية ذات أهمية عندما يصبح الجداء  $b \times c$  مساوياً أو اكبر للجداء  $d \times s$  . وهكذا فالقيمة الحدية للتواتر التي تصبح علاقة نيكويست الأخيرة غير صالحة لقيم التواتر الأكبر منها هي :

$$c = \frac{d \times s}{b} = 2.07 \times 10^{11} \times d$$

عندما نأخذ الآثار الكوانتية بعين الاعتبار ، لا نجد ضجيجاً اكثر في التواترات العالية ، بينما نجد ضجيجاً قليلاً جداً عند التواترات الضوئية . إلا أن هناك قيوداً كوانتية غير تلك التي يفرضها الضجيج جونسون . ولكن يبقى المقدار  $6.63 \times 10^{-34}$  جول لكل بيت هو الحد العملي حتى في مجال

الضوء المرئي ويتعذر الوصول عمليا الى ذلك الحد في الاحوال الفعلية .  
 هناك طريقة شائعة وغير صحيحة للاتصال ، وهي في واقع الامر أسوأ ،  
 وتتلخص بتضخيم إشارة ضعيفة مستقبلة باستخدام مضخم جيد .  
 إن هذا ممكن من الناحية النظرية ، ولكنه سيء للمذاق ياترى ؟.

عندما تضخم نبضة ضعيفة عند تواترات منخفضة نحصل ببساطة على  
 على نبضة ذات استطاعة أكبر نستطيع قياس زمن صعودها الى ذروتها  
 وطيف تواترها تعترض علاقة هايزنبرغ للريبة في الميكانيك الكوانتي ، إذ  
 وفق هذه العلاقة لا نستطيع قياس الزمن والتواتر معا وبدقة لا متناهية .  
 إذا رمزنا للخطأ في قياس الوقت بالرمز  $\Delta t$  ، وللخطأ في قياس التواتر  
 بالرمز  $\Delta \nu$  ، فإن أحسن ما يمكننا فعله متضمن في العلاقتين :

$$\Delta \nu \times \Delta t = 1$$

$$\Delta \nu = \frac{1}{\Delta t}$$

تنطوي هذه العلاقة على حقيقة مفادها اننا إذا اقتربنا من تواتر النبضة  
 بدقة بالغة عن طريق تصغير  $\Delta t$  ، فإننا بالمقابل لن نستطيع تحديد  
 لحظة وصول النبضة بدقة كافية . وبكلمات أوضح : لا نستطيع تحديد  
 لحظة وصول نبضة طويلة ذات حزمة تواترات ضيقة بدقة كافية كما نفعل  
 في حالة نبضة قصيرة ذات عرض كبير . ولكن كم نحن عاجزون عن محاولة  
 إجراء مثل هذا القياس ؟

لنفرض اننا نضخم نبضة ضعيفة باستخدام أجود مضخم ممكن واننا  
 نزيح كل تواتراتها حتى مجال أدنى تضعف عنده الآثار الكوانتية . نجد  
 عند ذلك استطاعة الضخيج ن ممزوجة مع الإشارة المضخمة :

$$N = J B T S$$

حيث :

ت : هو تواتر الإشارة الأصلية العالية التواتر .

ج : هو الكسب الطاقي لنظام التضخيم والإزاحة .

س : عرض الحزمة يؤكد هذا الضجيج ، وفق قيمته المحسوبة  
هذه ، اننا لن نستطيع إجراء القياسات بدقة أكبر من تلك التي تسمح لنا  
بها علاقة هايزنبرغ للريبة .

يجب ان نزيد عرض الحزمة س بهدف زيادة دقة قياس الوقت ،  
إلا أن الضجيج الإضافي الذي يترتب على زيادة عرض الحزمة والمعطى  
بالعلاقة الأخيرة سينقص من دقة قياس الوقت التي وفرتها زيارة  
عرض الحزمة .

نستطيع باستخدام العلاقة الأخيرة واسلوب مناقشة قدمناه للتو،  
ان نصل الى استنتاج مفاده ان علينا استخدام طاقة لا تقل من  
٦٩٣ ر . ب ت جول لكل بيت في ظل الآثار الكوانتية كي نستطيع تحقيق  
الاتصال بإشارة تواترها ت . تصلح هذه المناقشات لانظمة الاتصالات  
التي نضخم فيها الإشارة المستقبلية باستخدام أجود المضخمات ، أي تلك  
المضخمات التي تضيف من الضجيج ما يكفي لإبعادنا عن تجاوز علاقة  
هايزنبرغ للريبة .

هل هناك بديل عن تضخيم الإشارة الضعيفة المستقبلية ؟

الإجابة نعم في حالة التواترات الضوئية . يمكن استخدام فوتونات  
الضوء لإنتاج نبضات كهربائية ضعيفة . تنتج بعض الأجهزة نبضات  
كهربائية قصيرة عندما تصلها فوتونات الضوء ؛ على الرغم من أنها قد  
تفشل أحيانا بالاستجابة لبعض الفوتونات بشكل عشوائي ، من هذه  
الأجهزة الخلايا الكهروضوئية . ان المردود الكوانتي العملي لهذه الأجهزة  
أقل من ١٠٠ ٪ .

نستطيع من وجهة نظرية ، على الرغم من ذلك ، تحديد لحظة وصول  
فوتون ضوئي بتوجيه ذلك الفوتون لإنتاج نبضة كهربائية قصيرة . الا يمكن  
ان يخاف هذا مبدا الريبة . كلا ، لان قياسنا للحظة وصول الفوتون  
بهذه الطريقة سيحول دون معرفة بأي قدر مهما كان صغيراً لتواتر ذلك  
الفوتون .

تستخدم عدادات الفوتونات لتحديد لحظات وصول الومضات الضوئية المنعكسة من المرايا التي تركها رواد الفضاء على سطح القمر ، كما تستعمل أيضاً في الاتصال بإرسال الأمواج الضوئية عبر الألياف البصرية . إلا أن استخدامها لا يطابق الحالة النظرية الممكنة ، فهناك حد دون ذلك الاستخدام هو ٦٩٣ر. ث د جول لكل بيت ، وهو حد سبق واعترضنا . لا تغير الآثار الكوانتية هذا الاداء الحدي ، ولكنها تجعل من إمكانية تحقيقه أمراً مستحيلاً . ما هو السبب ؟

ان طاقة الفوتون هي : ب ت ، اما الطاقة النظرية لكل بيت فهي ٦٩٣ر. ث د ، وهكذا يمكننا ان نحسب كم بيت لكل فوتون من حاصل القسمة :

$$\frac{\text{ب ت}}{\text{٦٩٣ر. ث د}} \quad \text{اي :}$$

$$144 \times \left( \frac{\text{ب ت}}{\text{ث د}} \right) \quad \text{بيت لكل فوتون}$$

كيف نستطيع ارسال طاقة مساوية لعدد من واحداث البيت بقياس لحظات وصول عدد قليل من الفوتونات أو لحظة وصول فوتون واحد . نفعل ذلك على النحو التالي : نبث من المصدر نبضة ضوئية خلال برهة من فترة زمنية طولها د مقسمة الى برهات عددها ل ، وعند المستقبل يلعب المجال الزمني الذي تتلقى الفوتون أثناءه دور موصل الرسالة .

سيسمع هذا في احسن الاحوال من نقل ما مقداره ل بيت من المعلومات لكل فترة زمنية د. الا أننا لن نتلقى اي فوتونات عند بعض اللحظات الزمنية ، بينما ستصل عند لحظات أخرى خاطئة فوتونات حرارية اي فوتونات ضجيج جونسون . ان هذا هو ما يجعل الارسال في

$$\text{حدود } 144 \times \left( \frac{\text{ب ت}}{\text{ث د}} \right) \quad \text{بيت لكل فوتون .}$$

نستطيع في الواقع العملي ارسال عدد اقل من واحداث البيت لكل فوتون لانه من غير العملي ان نسعى الى انظمة فعالة بامكانها ارسال عدد كبير من واحداث البيت لكل فوتون .

تواصلنا بتوحيد نظرية المعلومات والفيزياء الى قيمة الطاقة الدنيا اللازمة لنقل بيت واحدة من المعلومات ، وهي : ٦٩٣. ث د جول .

ان الضجيج الموجود بشكل فعلي في اجهزة الراديو المعاصرة اكبر من الضجيج المحيط لان المضخم يضيف ضجيجاً مقابلاً لدرجة حرارة اعلى من درجة حرارة المحيط . دعونا نستخدم درجة حرارة الضجيج د بدلاً من درجة حرارة الضجيج المثلة للضجيج المضاف فعلاً الى الإشارة كيف يمكننا ان نقارن الاداء الفعلي مع العلاقة النظرية :

$$ص = س لبع ( ١ + \frac{ث د س}{ق} )$$

اذا لم نلجأ الى تصحيح الاخطاء واكتفينا باستخدام قدر من طاقة الإشارة يكفي لتصبح الاخطاء في المعلومات المستقبلية قليلة الحدوث ( يحدود خطأ واحد لكل ١٠٠ ٠٠٠ ٠٠٠ بيت مستقبلية ) فان علينا استخدام طاقة لكل بيت تساوى عشرة اضعاف ما تعطيه العلاقة النظرية المذكورة .

ان اكثر انظمة الاتصالات تعقيداً هي تلك التي تستخدم لارسال المعلومات من المركبات المرتحلة في اعمق الفضاء . وهي عبارة عن اجهزة ميزر مستقبلية ذات ضجيج منخفض تتضمن الترميز وحل الترميز الالتفاني وفق مخطط فيتربي . استطاعت مركبة فويجير ارسال صور المشتري وتوابعه الى الارض بيت ١١٥٢٠٠٠ رقم ثنائي في كل ثانية بنسبة خطأ ٥٠ ٪ واستخدام استطاعة قدرها ٢١٣ واط ولا تزيد استطاعة الصوت الا بمقدار ١ ديسيبل عن الحد المثالي الناجم عن عرض تواتري لامتناه في الكبير .



يبعد بلوتو حوالي  $6 \times 10^{12}$  متر عن الأرض . ما هي سرعة الإرسال التي تستطيع مركبات الفضاء المرتحلة إليه تحقيقها . نفرض أن المصدر الوحيد للضجيج هو الفضاء الكوني ، ونهمل امتصاص الغلاف الجوي .

إذا استخدمنا هوائي إرسال مساحته الفعالة  $C_r$  وهوائي استقبال مساحته الفعالة  $C_t$  ، تصبح نسبة الاستطاعة المستقبلية إلى الاستطاعة المرسله وفق علاقة فرييس للإرسال مساوية :

$$\frac{C_r \times C_t}{\lambda^2 \times \lambda^2} = \frac{C_r}{\lambda^2}$$

حيث  $\lambda$  هو طول الموجة المستخدمة في الاتصال و  $\lambda$  هو البعد بين المرسل والمستقبل ويساوي في حالتنا  $6 \times 10^8$  متر .

ننتقي بشكل اختياري مرسلًا استطاعته ١٠ واط . سنعتبر هنا حالتين . نستخدم في الحالة الأولى موجة طولها ١ سنتيمتر أو ٠.٠١ متر . يقابل طول الموجة هذا درجة حرارة للفضاء ، مساوية إلى ٣٥ كالفن . نفرض أن مساحة هوائي الإرسال ١٠ متر مربع وهو على شكل مربع ضلعه ٣.١٦ متر ، بينما هوائي الاستقبال هو مربع آخر ضلعه ٣.١٦ متر ومساحته ١٠٠ متر مربع . تبين العلاقة الأخيرة أنه إذا كانت الاستطاعة

— ١٧ —

المرسله المستقبلية  $2.8 \times 10^{-10}$  واط . إذا اعتبرنا الطاقة لكل بيت ٦٩٣ ر . حيث  $d = 35$  كالفن ، نستنتج أن أجهزة الإرسال على المركبة الفضائية تستطيع إرسال ٨٠٠٠٠٠ بيت في كل ثانية ، وهي كمية ممتازة من المعلومات .

وماذا عن نظام الاتصال الضوئي نفرض ان طول الموجة  $6 \times 10^{-7}$  متر  
وهو يقابل تواتراً قدره  $5 \times 10^{14}$  هـ ف ث ، وهذا هو الضوء المرئي .  
نفرض هوائيات اصغر ( عدسات أو مرايا ) ، مثلاً الهوائي المرسل مربع  
ضلعه ١ متر ومساحته ١ متر مربع ، والهوائي المستقبل مربع آخر ضلعه  
١٠ متر ومساحته ١٠٠ متر مربع . ونفرض هنا مرة أخرى ان استطاعة  
الارسال هي ١٠ واط . ان درجة الحرارة الضوئية للفضاء ، أي مجموع  
ضوء كل النجوم ، هي كمية غير معروفة تماماً وسنفرضها هنا ٢٥٠  
كالفن . نحسب سعة ارسال مقدارها ٨٠٠ مليون الف بيت لقناتنا  
الضوئية .

اذا تلقينا ٨٠٠ الف مليون بيت في كل ثانية ، فيجب ان نلقى ١٠٠  
بيت لكل فوتون . يبدو من غير المحتمل تحقيق ذلك . ولكن حتى لو  
تلقينا بيت واحد لكل فوتون فسنستطيع استقبال ثمانية آلاف مليون  
بيت في كل ثانية . يبدو الاتصال الضوئي افضل طرق الاتصال عبر  
المسافات البعيدة في الفضاء .

ان أهم جوانب العلاقة بين نظرية المعلومات والفيزياء ، من منظور  
نظرية المعلومات ، هي التقييم الدقيق للقيود التي لا يمكن الخلاص منها  
والتي تفرضها قوانين الفيزياء على عمليات الاتصال . تتركز القيود  
بشكل رئيسي في ضجيج جونسون والآثار الكوانتية . إلا ان هناك قيوداً  
أخرى كاضطرابات الغلاف الجوي التي تشوه الإشارة بشكل مفاير لما  
تفعله اضافة الضجيج اليها . يمكن القاء الاضواء امثلة أخرى من هذا  
النوع من العلاقة بين الفيزياء ونظرية المعلومات .

استغرقت الفيزيائيين فكرة ارتباط بين الفيزياء ونظرية الاتصالات  
مستقلة عن المسألة الاساسية التي اخذت نظرية الاتصالات على عاتقها  
مهمة حلها أي بإمكانيات تقييد الترميز الفعال لدى بث المعلومات عبر  
قناة ذات ضجيج .

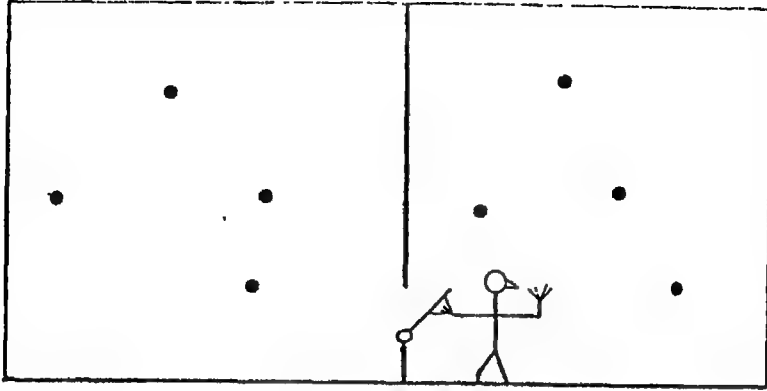
يقترح الفيزيائيون استخدام مفهوم ارسال المعلومات ليبرهنوا استحالة الآلة الدائمة الحركة من النوع الثاني . لقد سبقت هذه الفكرة ، في الواقع ، اختراع نظرية الاتصالات في ربحها المعاصر ، فقد قدم زيلارد افكاراً مماثلة عام ١٩٢٩ .

تنتهي بعض الآلات الدائمة الحركة الى خلق الطاقة من لا شيء وهذا الفعل يخالف القانون الاول للترموديناميك ، اي قانون انخفاظ الطاقة . اما بعض الآلات الدائمة الحركة الاخرى فتفضي الى ترتيب للطاقة الحرارية الموزعة اصلاً في المادة او الاشعاع بشكل فوضوي ضمن فرس ثبات درجة الحرارة ، كما في دوران دولاب الموازنة الذي يمكن استخدامه لادارة محرك قد يقوم بتبريد بعض الاجسام وتسخين بعضها الآخر وهكذا فبإمكان هذا النوع من الحركة الدائمة نقل الطاقة من الاجسام الباردة الى الاجسام الساخنة دون استخدام طاقة منظمة اضافية .

ينص القانون الثاني للترموديناميك على استحالة نقل الحرارة من الاجسام الباردة الى الاجسام الساخنة بدون توظيف طاقة منظمة يمكن وضع هذا القانون في صيغة اخرى تقول : يستحيل تناقص الانتروبي الخاصة بأي نظام . وهكذا نرى ان الآلات الدائمة الحركة من النوع الثاني تنتهك القانون الثاني للترموديناميك .

اخترع جيمس كلارك ماكسويل اكثر الآلات الدائمة الحركة من النوع الثاني شهرة . تستخدم هذه الآلة كائناً وهمياً هو شيطان ماكسويل . يوضح الشكل ١٠ - ٢ هذه الآلة .

يقطن هذا الشيطان علبة مقسومة وبإمكانه تحريك باب بين القسمين عندما يشاهد جزيئاً سريعاً يتحرك جهة الباب من القسم الآخر ، يفتح الباب ويدفع هذا الجزيء يدخل ناحيته ، وعندما يشاهد جزيئاً بطيئاً مندفعاً من جهته نحو الباب ، يسمح له بالمرور نحو الجانب الآخر . انه باختصار يمنع الجزيئات البطيئة من دخول قسمه والجزيئات السريعة



الشكل ١٠ - ٢

من مفادته . وهكذا يتحول الغاز في قسمه بعد فترة إلى مجموعة من الجزيئات السريعة ، أي إلى غاز حار ، وعلى العكس يتحول الغاز في القسم الآخر إلى مجموعة من الجزيئات البطيئة أي إلى غاز بارد . ان شيطان ماكسويل يستطيع تحقيق انتقال الحرارة من القسم البارد إلى القسم الحار . يبين الشكل ١٠ - ٢ هذا الشيطان وهو يحرك الباب كما يشاء بإحدى يديه ، بينما يدير أنفه باليد الأخرى للقانون الثاني للترموديناميك .

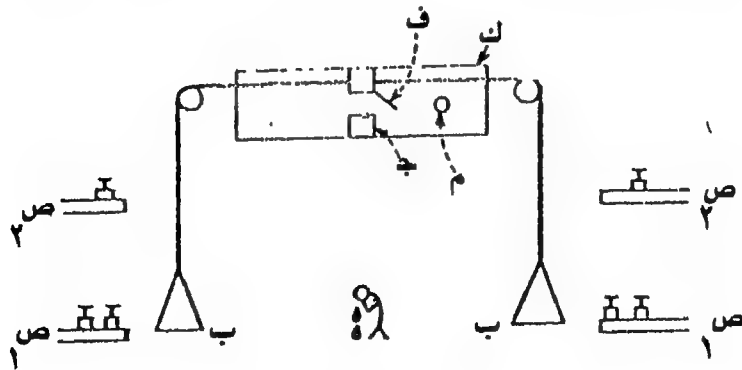
بقي شيطان ماكسويل محيراً لأولئك الفيزيائيين الذين لم يكتفوا بعدم الاكتراث به . نستطيع وضع اعتراض رئيسي ضده ، ينطوي هذا الاعتراض على أن بيئة الشيطان موجودة في حالة توازن حراري ، وأن الضوء الوحيد الموجود هو الأشعاع الكهرومغناطيسي العشوائي المقابل للضجيج الحراري ، وهو ضوء شديد التشويش لدرجة لا يستطيع معها الشيطان استخدامه لتمييز الجزيئات المندفعة نحو الباب .

يمكننا طرح بدائل أخرى لشيطان ماكسويل . ماذا لو وضعنا ، مثلاً ، باباً ذا نابض بين الحجرتين بحيث يمكن لجزيء متحرك الارتطام

به وفتحه اذا اتى من احدى الجهتين ولا يستطيع ذلك اذا اتى من الجهة الاخرى . الا ينتهي الامر الى تجمع كل الجزيئات بكل طاقتها في الجانب الذي ينفتح الباب في جهته .

يمكننا ان نضع الاعتراض التالي على الباب ذي النابض : اذا كان النابض قويا فإن أي جزيء لن يكون بإمكانه فتح الباب ، بينما اذا كان النابض ضعيفا فإن الطاقة الحرارية ستجعل الباب في حالة خفقان دائم وسيبقى مفتوحا في معظم الاوقات . كما ان الجزيئات ستنتقل الطاقة الى الباب لدى فتحه . لقد اجمع الفيزيائيون على ان الاجهزة الميكانيكية المماثلة للباب ذي النابض او الدواليب المسننة الدقيقة لن تستطيع ان تنتهك القانون الثاني للترموديناميك .

ان مناقشة ماهو ممكن وماهو غير ممكن هي مناقشة بالغة الحساسية . لقد استطاع أحد الاصدقاء خداعي بالة اختراعها ، حتى تنبعت الى حقيقة ان ارى حيز مفلق في حالة توازن حراري يحتوي على جزيئات عشوائية واشعاع كهرومغناطيسي عشوائي . الا ان هناك آلة واحدة بسيطة وهي على الرغم من كونها عديمة الاحتكاك ، مضحكة ، وغير عملية بالمعنى التطبيقي ، فالارجح انها غير مستحيلة فيزيائيا بالمعنى الضيق الذي يستخدم الفيزيائيون به هذه العبارة . يوضح الشكل ١٠ - ٣ هذه الآلة .



الشكل ١٠ - ٣

تستخدم هذه الآلة اسطوانة ك ومكبسًا عديم الاحتكاك ح . عندما يتحرك ح الى اليمين او اليسار يرفع احدى الكفتين ب ويخفض الاخرى يحتوي المكبس ح على فتحة ف يمكن فتحها واغلاقها . تحتوي الاسطوانة على جزيء واحد فقط هو م . تثبت درجة حرارة الآلة عند قيمة معينة د . سيثابر الجزيء م على فقلان وكيبب الطاقة لدى ارتطامه بجدران الاسطوانة وستكون طاقته الوسطية متناسبة مع درجة الحرارة . اذا حركنا المكبس ببطء الى اليمين او اليسار وكانت الفتحة مغلقة ، لما لازم بدل اي عمل نبدا والفتحة غير مغلقة ، نضبط المكبس في المركز من الآلة ونثبتته ثم نغلق الفتحة . ندقق بعد ذلك لمعرفة الجانب من الاسطوانة الذي يتحرك ضمنه الجزيء ، ثم نضع وزن مقارنة ص<sub>1</sub> على الكفة التي تقع في نفس جهة الاسطوانة الحاوية على الجزيء . نحرر المكبس . ماذا يحصل ؟ ان الارتطام المتكرر للجزيء على المكبس سيرفع في النهاية الكفة الحاوية على وزن المقارنة ص<sub>1</sub> نفتح بعد ذلك الفتحة ، ثم نضبط المكبس في المركز من الآلة ونكرر العملية . نتلخص نتيجة عملنا باننا استطعنا رفع عدد كبير من اوزان المقارنة الى الاعلى ، وبكلمة اوضح انجزنا عملا منظماً باستخدام طاقة حرارية غير منظمة .

كم هي قيمة العمل الذي بذلناه ؟ يمكننا ان نبرهن على ان القيمة الوسطية للقوة التي يدفع بها الجزيء المكبس هي :

$$Q = \frac{\Delta}{L}$$

حيث ل هو البعد بين المكبس وطرف الاسطوانة في الجهة التي يتحرك ضمنها الجزيء . عندما نسمح للجزيء بدفع المكبس وسوقه ببطء الى نهاية الاسطوانة بحيث تتضاعف المسافة ، فان اكبر قيمة للعمل الذي يبذله الجزيء هو : س = ٦٩٣ د. ث د

واقع الامر ان العمل المبذول لرفع وزن ثابت سيكون اقل من ذلك ، فالمعلاقة الاخيرة تمثل الحد الاعلى ، ولكن هل حصلنا على ذلك بدون مقابل ؟

ليس تماماً ، فعندما ضبطنا المكبس في المركز واغلقنا الفتحة نجد انفسنا امام احتمالين متساويين يتعلق بوجود الجزئي في احدى جهتي الاسطوانة . يلزمنا كم معلوماتي يساوي بيت واحدة كي نستطيع اتخاذ القرار المناسب حول الكفة التي سنضع عليها وزن المقارنة وتصلنا هذه المعلومة ضمن نظام درجة حرارته د . ما هي القيمة الدنيا للطاقة اللازمة لارسال بيت واحدة من المعلومات في درجة حرارة د . لقد حسبنا هذه القيمة للتو ، انها تساوي بالضبط ٦٩٣. ث د جول ، تساوي هذه القيمة الاخيرة الحد الاعظمي للطاقة التي يمكن للآلة ان تولدها . ينطبق هذا من حيث المبدأ على الحالة الكوانتية ، اذا فعلنا اكثر ما هو ممكن وهكذا نستخدم كل خرج الآلة لبث المعلومات الضرورية لاستمرار عمل هذه الآلة .

ان من العبث ان نناقش ما هو فعلي وممكن تحقيقه في مقابل المردود المحدود لمثل هذه الآلة ، اذ انه وفي احسن الاحوال سنخرج من التجربة دون ربح او خسارة .

لقد بينا الآن من خلال حالة بسيطة ان ارسال المعلومات وفق نهج نظرية الاتصالات يمكننا من تحويل الطاقة الحرارية الى طاقة ميكانيكية . ان واحدة البت التي تقيس كمية المعلومات المستخدمة هي نفسها الواحدة التي نقدر بموجبها، انتروبي مصدر رسائل في نظرية الاتصالات . اما انتروبي الترموديناميك فتقرر اي جزء من الطاقة الحرارية يمكن تحويله الى طاقة ميكانيكية . يبدو طبيعياً ان نحاول ربط انتروبي الترموديناميك والميكانيك الاحصائي بانتروبي نظرية الاتصالات .

ان انتروبي نظرية الاتصالات هي قياس الريبة فيما يتعلق باي رسالة من ضمن مجموعة ممكنة من الرسائل سيقوم مصدر الرسائل بتوليدها فعلاً في ظرف معين . اذا اختار المصدر رسالة من بين عدد م من الرسائل المتساوية الاحتمال ، تكون الانتروبي مقدرة بالبيت لكل رسالة مساوية للوغاريتم م من الاساس ٢ . يتضح انه يمكن بث الرسائل

في هذه الحالة باستخدام عدد من الارقام الثنائية لكل رسالة مساو ل  
لع م . تبرز اهمية انتروبي نظرية الاتصالات بشكل عام ، من كونها  
تقيس مباشرة العدد الوسطي للارقام الثنائية اللازمة لبث الرسائل التي  
يولدها مصدر رسائل معينة .

أما انتروبي الميكانيك الاحصائي فتقيس الريبة المتعلقة بالحالة التي  
يمكن أن تكون فيها جملة فيزيائية . يفترض في الميكانيك الاحصائي أن  
كل الحالات الممكنة ، المقابلة لطاقة معينة ، متساوية الاحتمال . تساوي  
انتروبي الميكانيك الاحصائي جداء ثابت بولتزمن في لوغاريتم عدد  
الحالات الممكنة مأخوذة بالنسبة للعدد النابيري  $e$  . ولهذا الانتروبي  
اهمية عظيمة في الميكانيك الاحصائي . ومن العلاقات الهامة ، تلك التي  
تعطي الطاقة الحرة :

$$ط ح = ط - ت \times د$$

حيث ط ح الطاقة الحرة ، ط الطاقة الكلية ، ت الانتروبي ، د  
درجة الحرارة . ان الطاقة الحرة بالتعريف ، هي ذلك الجزء من الطاقة  
الكلية الذي يمكن ان ينحول الى طاقة منظمة كطاقة جسم مرفوع .

ان فهم انتروبي الميكانيك الاحصائي يقودنا الى الحديث عن الجمل  
الفيزيائية جسما صلباً متبلوراً أو حيزاً مغلقاً يحتوي على كمية من الماء  
والبخار أو زجاجة مليئة بالغاز ، أو أي مادة أو مجموعة من المواد .  
سنعتبر مثل هذه الجملة في حالة توازنها أي حالة استقرارها عند درجة  
حرارة معينة وعند الحد الذي تكون لئحل انتفاعلات الفيزيائية والكيميائية  
الممكنة الحدوث قد أخذت عنده مداها .

نعتبر كمثال على الجمل الفيزيائية حالة غاز مكون من جسيمات  
لا متناهية الصغر تتطاير في كل اتجاه داخل وعاء حار للفلز .



ان حالة هذه الجملة هي توصيف كامل ، او توصيف كامل بقدر ما نسمح قوانين الفيزياء ، لكل مواقع وسرع هذه الجسيمات فوق الميكانيك الكلاسيكي اي قوانين نيوتن في الحركة يكون لكل جسيم سرعته وطاقته وهكذا فهناك عدد مستقر لا نهاية له من الحالات ، كما ان هناك عددا لا نهاية له من النقاط واقعة على مستقيم او داخل مربع اما التناول الكوانتي لهذه الجملة فيصفها بعدد منفصل بغير مستمر وغير منته من الحالات . وهكذا يتشابه المنظور الكلاسيكي للمسألة مع مشكلة الاشارات المستمرة المعقدة في نظرية الاتصالات ، بينما يقابل التناول الكوانتي حالة الاشارات المنفصلة المكونة من رموز منفصلة مختلفة . ولقد تناولنا الحالة الأخيرة باسهاب في هذا الكتاب .

يحدد الميكانيك الكوانتي عددا معيناً من سويات الطاقة يمكن لجزيء من غاز مثالي ان يحتل احدها ، ويقال عندها ان لهذا الجزيء سوية طاقة معينة كم ستكون انتروبي ذلك الغاز . اذا زدنا حجم الغاز فان ذلك ينعكس بزيادة في عدد سويات الطاقة المختلفة ضمن نفس مجال الطاقة السابق . ان هذا يزيد عدد الحالات التي يمكن للجملة ان تتخذها وبالتالي تزداد الانتروبي . يحدث مثل هذا الازدباد في الانتروبي اذا سمحنا لكمية من الغاز حبيسة في حيز معين ان تتمدد فجأة لتملأ حيزاً أكبر .

اذا زدنا درجة حرارة غاز مع المحافظة على حجمه احتلت جزيئاته سويات طاقة أعلى ، واصبح بالامكان دمج سويات مختلف من الطاقة لتكوين سويات جديدة ياخصار يزيد عدد سويات الطاقة وتزيد الانتروبي تبعاً لذلك .

اذا تحدد غاز بجوار مكبس بطيء الحركة ، ولم تضاف أي كمية من الحرارة الى الغاز ، تزداد السويات المختلفة في مجال معين للطاقة ، الا ان درجة الحرارة تهبط بحيث يبقى العدد الاجمالي لسويات الطاقة والانتروبي دون تغيير .

نستنتج إذن ، انه من أجل نفس درجة الحرارة ، تكون انتروبي الغاز المتجمع في حيز صغير أقل من انتروبي نفس الغاز عندما يشغل حجماً أكبر . ينطبق هذا على حالة الغاز المكون من جزيء واحد في الشكل ١٠ - ٣ ، اذ تكون الانتروبي أقل عندما تكون الفتحة مغلقة والجزيء حبيس في احد جانبي الاسطوانة ستكون الانتروبي ، أقل ، في الحد الأدنى عندما نعلم في أي من جهتي الاسطوانة يسبح الجزيء .

نستطيع بسهولة حساب نقصان الانتروبي الناجم عن خفض حجم غاز مكون من جزئي واحد الى النصف مع الحفاظ على درجة حرارته . يفضي خفض الحجم هذا الى انقاص عدد حالات الغاز وتنقص الانتروبي تبعاً لذلك بالمقدار التالي :

$$\Delta S = - R \ln 2$$

اما التغير المقابل في الطاقة الحرة فهو يساوي نظير حاصل ضرب تغير الانتروبي في درجة الحرارة أي :  $\Delta F = - RT \ln 2$  .

يساوي هذا التغير ، وفق ما تقدم، العمل الذي نحصل عليه بتصنيف حجم الغاز المكون من جزيء واحد ومن ثم السماح له بالتمدد ودفع المكبس حتى يعود الى حجمه الاصلي . وهكذا فحساب الطاقة الحرة يفضي الى هذه العلاقة .

نستذكر انه في حالة الغاز ذي الجزئي الواحد تلزمنا كمية من المعلومات تساوي بيت واحدة لمعرفة موقع الجزيء ويجب ان نبث هذه المعلومة على خلفية من الضجيج تقابل درجة حرارة د ، وهذا بدوره يقتضي توفر  $R \ln 2$  .

عندما نعلم الآن ان الجزيء موجود في جهة معينة من المكبس ، فان الانتروبي تصبح أقل بـ  $R \ln 2$  . ث د مما لو كنا غير واثقين من الجهة التي يوجد فيها هذا الجزيء . يقابل هذا الانخفاض في الانتروبي ازدياد في

الطاقة الحرة مقدرة ٦٩٣. ث د جول . نستطيع أن تحول هذه الطاقة الحرة الى عمل بالسماح للمكبس بالحركة نحول قسم الاسطوانة غير المشغول حينما يدفعه الجزيء عبر اصطدامات متتالية بسطحه . ترتفع عند هذه النقطة الانتروبي الى قيمتها الاصلية وتكون قد حصلنا من الجملة على كمية من الطاقة ، الا ان هذه الطاقة تساوي مع الاسف الحد الأدنى للطاقة اللازمة لبث المعلومات التي ابلغتنا عن الجهة التي يسبح الجزيء فيها .

نعتبر الآن حالة اكثر تعقيدا . نفرض أن الجملة فيزيائية معينة عددا من الحالات م في درجة حرارة ثابتة واننا جزانا هذه الحالات الى زمر تحتوي كل منها على  $\frac{f}{n}$  حالة ، اي أن عدد الزمر هو ن .

نبحث الآن عن الخصائص المرتبطة بانتماء الحالة التي تكون عليها الجملة الى احدى هذه الزمر . ان انتروبي المصدر وفق نظرية الاتصالات هي لع ن بيت ، ذلك لان هناك ن زمرة من الحالات متساوية الاحتمال . يعني ذلك انه لتحديد الزمرة التي تقع فيها حالة الجملة ألفيزيائية يلزم توظيف ن رقم ثنائي . اما بث هذه المعلومات في درجة حرارة د ، فيتطلب الطاقة :

$$٦٩٣. ث د لع ن = ث د لع ن جول$$

اي ان الطاقة اللازمة لبث الرسالة تتناسب مع انتروبي مصدر الرسائل وفق نظرية الاتصالات .

اذا علمنا أن الجملة موجودة في إحدى حالاتها ذات العدد م ، تكون الانتروبية : ث لع م .

اما في حالة معرفتنا الاكيدة بان الجملة في حالة تنتمي لزمرة معينة من الزمر التي تحتوي كل منها على  $\frac{f}{n}$  من الحالات ، تكون الانتروبي :

$$ث لع \frac{f}{n} = ث (لع م - لع ن)$$

وهذا يشابه حالة ما بعد الارسال حين نعتبر في أي من الحالات تكون الجملة .

أن تغير الانتروبي الناجم عن المعلومات المتعلقة بتحديد الزمرة التي تنتمي إليها حالة الجملة هو : - ث ل ع ن .

والزيادة المقابلة في الطاقة الحرة تساوي ث د ل ع ن .

يساوي هذا الطاقة الدنيا اللازمة لبث المعلومات المتعلقة بتحديد الزمرة التي تنتمي إليها حالة الجملة ، وهي المعلومات التي قادت إلى إنقاص الانتروبي وزيادة القدرة الحرة .

نعتبر كمصدر رسائل أي عملية بإمكانها أن تفضي إلى أي معطى يتعلق بالحالة التي قد تكون جملة ما قد اتخذتها . يولد هذا المصدر رسالة تخفض ربيتنا حول حالة الجملة المذكورة . ان لهذا المصدر ، وفق نظرية الاتصالات ، انتروبي لكل رسالة . تساوي هذه الانتروبي عدد الأرقام الثنائية اللازمة لبث الرسالة التي يولدها المصدر . ويلزم كمية معينة من الطاقة لارسال كل رقم ثنائي من الرسالة على خلفية من الضجيج تقال درجة حرارة د .

تخفض الرسالة ربيتنا فيما يتعلق بالحالة التي اتخذتها الجملة ، وهكذا تخفض أيضاً انتروبي الجملة وفق الميكانيك الاحصائي ، وهذا التخفيض يزيد بدوره الطاقة الحرة للجملة ، إلا ان هذا الزيادة تساوي القيمة الصغرى للطاقة اللازمة لبث الرسالة التي أدت ازدياد الطاقة الحرة ، وهي طاقة متناسبة مع انتروبي نظرية الاتصالات :

اعتقد ان هذه العلاقة هي العلاقة المنشودة بين انتروبي نظرية الاتصالات وانتروبي الميكانيك الاحصائي . وهكذا علينا دفع ثمن ما للمعلومات التي تقود إلى تخفيض انتروبي الميكانيك الاحصائي للجملة . يتناسب هذا الثمن مع انتروبي نظرية الاتصالات لمصدر الرسائل الذي يولد المعلومات . يجب أن يكون هذا الثمن مرتفعاً بما فيه الكفاية لكي تكون الآلة الدائمة الحركة من النوع الثاني مستحيلة .

يجب أن نلاحظ على كل حال أن مصدر الرسائل الذي يولد رسائل تتعلق بالحالة التي تكون عليها جملة فيزيائية ما ، هو مصدر خاص ومن نوع متفرد . تعتبر النصوص اللغوية المكتوبة أو المنطوقة من أكثر المصادر شيوعاً ، إلا أنه لا يهمننا على الإطلاق أن نربط أية انتروبي خاصة بها بانتروبي فيزيائية الطابع ، اللهم إلا من خلال الطاقة اللازمة لبث بيت واحدة من المعلومات في ظل ظروف مثالية للغاية .

تفضي معالجاتنا السابقة أنى ما هو غريب نوعاً ما ، فالطاقة التي نبذلها لبث المعلومات عن حالة جملة فيزيائية معينة تحول بيننا وبين معرفة الماضي بشكل مفصل . وإذا لم يكن بإمكاننا معرفة الماضي بشكل كامل ، فهل نعلم أن ذاك الماضي فريد زمانه ؟ وهل هذا السؤال معقول حقاً ؟

أوجزنا في هذا الفصل بعض المشاكل المتعلقة بالاتصال كهربائياً في عالمنا الفيزيائي الواقعي . رأينا كيف أن بعض الظواهر الفيزيائية كالبروق والصواعق وأجهزة إقلاع السيارات تنتج تشويشات كهربائية أو ضجيجاً يضاف إلى الإشارات الكهربائية التي نستخدمها لبث الرسائل . يسبب هذا الضجيج أخطاء في الإرسال كما يحدد من سرعة بث المعلومات عند استخدام طاقة وحزمة تواترات معنيتين للإشارة .

إن الضجيج الصادر عن الأجسام الحارة هو ضجيج شامل بسيط ولا يمكن تجنبه وهو لذلك هام للغاية في كل أنواع الاتصالات . نشير هنا إلى أن كل جسم في الكون هو في نهاية المطاف جسم حار إذا كانت حرارته أعلى من الصفر المطلق . تظهر عند التواترات العالية الآثار الكوانتية وكذلك ضجيج جونسون أو الضجيج الحراري ، ولقد رأينا تأثيرها في الحالة الحدية لحزمة لا نهائية العرض ، إلا أنه مع ذلك لا يوجد مقابل كوانتي للعلاقة :

$$ص = س \text{ لع } ( ١ + \frac{ق}{ث د س} )$$

أدى استخدام مصطلح الانتروبي في الفيزياء ونظرية الاتصالات على حد سواء إلى التساؤل عن إمكانية وجود علاقة بين هذين الوجهين للانتروبي . يمكن أن نبرهن في حالة بسيطة أن القيود المفروضة على إرسال المعلومات من قبل الضجيج الحراري تحول دون تصميم آلة يمكنها تحويل الطاقة الحرارية العشوائية إلى طاقة منظمة لثقل مرفوع ، إذ أن نجاح مثل هذه الآلة سيخرق القانون الثاني للترموديناميك . دعونا نعتبر أن بحثنا يتناول الحالة التي يمكن أن تكون عليها جملة فيزيائية معينة . كمصدر لرسائل . تساوي انتروبي هذا المصدر وفق نظرية المعلومات القدرة اللازمة لبث رسالة من المصدر على خلفية من الضجيج الحراري الموجود حتماً في الجملة المعتبرة . إن الطاقة المستخدمة لبث مثل هذه الرسالة تساوي الازدياد في الطاقة الحرة الناجم عن الانخفاض في الانتروبي الفيزيائية الناجم بدوره عن الرسالة .



## الفصل الحادي عشر السيبرنيتيك

تملك بعض الكلمات مزايا خاصة فمنها ما يثير مشاعر الرعب ، أو الإحساس بالقموض ، أو النشوة الشعرية ، فلقد وصفت الممثلة دوروثي لامور بأنها ( غريبة ودخيلة ) وهي ترتدي السارونغ ( اللباس الوطني في الملايو ) . ولئن كنت لا أعلم بالضبط المعنى العام لهذه الصفة عند الناس ، إلا أنني واثق بأن كلمة أجنبي ( وهي المعنى الأصلي لكلمة exotic التي ترجمناها بالغريب أو الدخيل ) شاحبة المدلول أمام ذلك المعنى الشائع . كما أن كلمة ( الرق ) تجعلني أفكر بالمجلدات المفقودة التي كانت تحوي أسرار سليمان أو سواها من العقائد السرية ، رغم أنني أعلم أن هذه الكلمة لا تعني أكثر من مخطوط أمحت كلماته لتفسح المجال لكتابة جديدة .

ونصادف أحيانا كلمات أو عبارات لا ترتبط بمعنى محدد وواضح وتحافظ خلال فترات استعمالها على سمتها السحرية البعيدة كل البعد عن أي تفسير دارج . فعبارتا ( الناموس الأعظم ) و ( النزوة الحيوية ) وكلمة ( العزيزة ) تمثل فيما أرى نماذج منها . لكنني لا أعتقد أن كلمة السيبرنيتيك تنتمي تماما إلى هذا النوع من الكلمات وأن كانت ذات نوعية محيرة وعبر شعري .

يعرف وينر السيبرنيتيك بأنه علم التحكم والاتصال في الكائنات الحية وفي الآلات وقد اقتبس الكلمة من المرادف اليوناني لمدلول موجه دفة

السفينة . لقد ظفر علم السيبرنيتيك بشهرة واسعة منذ نشر كتاب وينر حوله عام ١٩٤٨ . وإذا قبلنا بوجود علم السيبرنيتيك فيجب ان يكون هناك من يمارسه ، وهكذا ولد مصطلح عالم السيبرنيتيك للدلالة على الشخص المتخصص في السيبرنيتيك .

ما هو علم السيبرنيتيك ؟ إذا استشرنا كتاب وينر لوجدنا ان هذا العلم يضم على الأقل نظرية المعلومات التي اصبحنا الآن ملمين بها وبقدر كاف . إنه شيء يمكن ان نسميه نظرية في الصقل والتصفية والكشف والتنبؤ ، نظرية تهتم بالبحث عن الوجود في الحاضر وتنبأ بالقيم والإشارات المستقبلية المصحوبة عادة بشيء من انضجيج واخيراً نظرية في الآلية المؤازرة والتفذية الراجعة السلبية التي اقتفى وينر اثرها حتى وصل لكتاب ألفه جيمس كلارك ماكسويل ، نشره عام ١٨٦٨ ، وتناول فيه موضوع المنظم ( وهو الجهاز الذي يحافظ على سرعة ثابتة للآلة البخارية ) . يجب ان نضيف ، على ما اعتقد ، علماً آخر هو علم الاتمته والآليات المعقدة وهذا يتضمن تعميم وبرمجة اجهزة الكمبيوتر .

ويجب الا ننسى كل ظواهر الحياة التي تشبه بشكل او بآخر كل او بعض ما اتينا على ذكره . وان نضمها تحت لواء السيبرنيتيك ، وهنا تقفز الى الدهن امثلة من بعض الوظائف السلوكية والتنظيمية للجسم ، إلا ان وينر يذهب الى ابعد من ذلك ، ففي كتابه « انا عالم رياضيات » يذكر ان عالم الاجتماع وعلم اصل الإنسان هما علمان أساسيان للاتصالات ، لذا يندرجان في قائمة اهتمامات السيبرنيتيك . ثم يستطرد ليقول إن علم الاقتصاد أيضا يقع دائرة السيبرنيتيك سيما أنه أحد فروع علم الاجتماع .

لا نستطيع التشكيك بمصداقية وينر إزاء كل ما قدمناه إلا بصعوبة . لقد كان رأياً واضحاً فيما يتعلق بالتناول الإحصائي لعالم الحياة والفكر ؛ فبالنسبة له تحول تيار البحث الصاعد ، عبر ماكسويل وبولتزمان وجيبس ، الى قاعدة فلسفية عريضة لديه ضمنها أيضاً أخلاقيات كيرغارد .



تكمّن المشكلة في أن كل منهج من المناهج العديدة التي وضعها وينر في بوتقة السيبرنيتيك له أغراضه ومجاله الخاص . ويقتضي الأمر استخدام آلاف الكلمات لشرح تاريخ ومضمون ومنظور كل منها . لذا فإن دمجها معاً يعني الحصول على تشكيل متباعد وغير متجانس سواء من حيث الكم أو الأهمية ، وهو لهذا أيضاً غير جذاب .

يتبين لنا مما تقدم سبب قلة عدد علماء السيبرنيتيك . وإذا أجرينا استفتاء بين جمهور العلماء من فحوى اختصاصاتهم لأجابت نسبة ضئيلة منهم « حقل السيبرنيتيك » . لو اعتبرنا من بين هؤلاء العلماء إخصائياً في الاتصالات ، أو الآلات الأوتوماتيكية المعقدة مثل أجهزة الكمبيوتر ، أو علم النفس التجريبي ، أو علم وظائف الجملة العصبية ، وأعدنا عليه سؤالنا بالحاح « هل تعمل في حقل السيبرنيتيك » ، لتأمل فينا طويلاً محلولاً فهم خلفياتنا وأهدافنا العلمية ، وإذا قرر أننا مجرد إناس غير متخصصين نحاول فهم ما يجري إلا أكثر ، لأجابتنا عندها باقتضاب : نعم .

ما زالت كلمة السيبرنيتيك حتى الآن تحتل عناوين الصحف والمجلات غير المتخصصة ، إن لم نقل المجلات التي لا علاقة لها بالعلم على الإطلاق ، وربما أن بإمكان هذه المجلات الإفاضة في امتداح السيبرنيتيك وتبيان مزاياه بأكثر مما يستطيعه العالم . وأؤكد في هذا المعرض الأهمية المستمرة لكتاب وينر « أنا عالم رياضيات » خاصة فيما يتعلق بأسس السيبرنيتيك يضم السيبرنيتيك ، كما قدمت ، حقولاً من المعرفة متنوعة ، وإن أضيقها هو في حقيقة الأمر واسع بحد ذاته لدرجة لا أجرؤ معها على الإسهاب بشرحه في كتاب واحد ، حتى لو بلغ حجمه أضعاف هذا الكتاب .

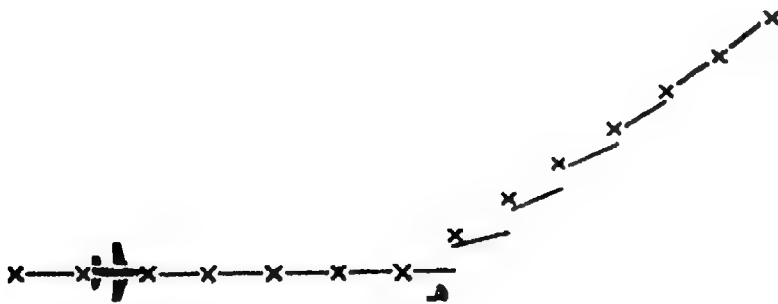
سأقتصر في هذا الفصل على محاولة عرض أفكار بسيطة تتعلق ببعض القضايا التكنيكية التي تتبادر إلى الذهن عند ذكر كلمة السيبرنيتيك . لن يكون هذا الموجز بدون فائدة ، إذ سيتمكن القارئ بفضل من كشف اهتماماته الشخصية إزاء السيبرنيتيك ، وإذا تبين أنه مهتم فعلاً ،

فسيضيف الموجز فائدة أخرى هي التعريف بنوعية المعلومات التي يتوجب على القارئ السعي وراءها لإرضاء اهتمامه .

نبدأ بالمرحلة الأولى لعلم السيبرنيتيك والتي دعوتها نظرية التنبؤ وهي ذات أهمية بالغة بحد ذاتها . إن هذه النظرية في واقع الأمر هي نظرية رياضية محضة ، إلا أننا نستطيع أن نجلو بعض قضاياها بمثال عملي .

نفرض أننا أمام مشكلة استخدام معلومات رادارته نبغي بواسطتها تسديد مدفع مضاد للطائرات بهدف إسقاط طائرة معادية . يعطينا الرادار سلسلة من قياسات يحدد كل منها موقع الطائرة بخطأ طفيف . يتوجب علينا أن نستخرج من هذه المعلومات مسار وسرعة الطائرة مما يمكننا من التنبؤ بمواقعها في فترات لاحقة ، ومن ثم إطلاق قذيفة مناسبة إلى أحد تلك المواقع وإسقاط الطائرة بالتالي .

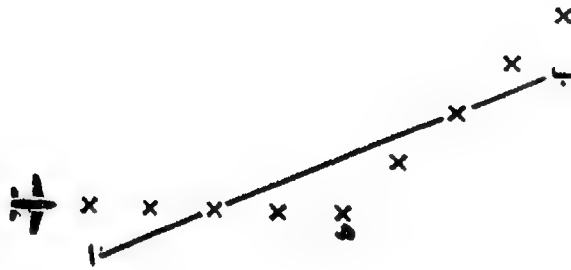
نفرض ثبات سرعة وارتفاع الطائرة . يوضع الشكل ١١ - ١ المعلومات الرادارية عن المواقع المتتالية للطائرة بإشارة  $x$  . نستطيع أن نرسم خطاً بالنظر  $A$  ب يمكن أن يكون جزراً معقولاً لمسار الطائرة كيف نستطيع تعليم الآلة لتقديم مثل هذا التنبؤ ؟



الشكل ١١ - ١

إذا طلبنا من الكمبيوتر أن يستخدم المعلومة الأخيرة ل ، والمعلومة السابقة لها مباشرة ن ل ، لرسم الكمبيوتر قطعة مستقيمة عبر هاتين النقطتين طبعاً هذا الإجراء خاطيء ، وعلى الكمبيوتر استخدام المعلومات السابقة أيضاً .

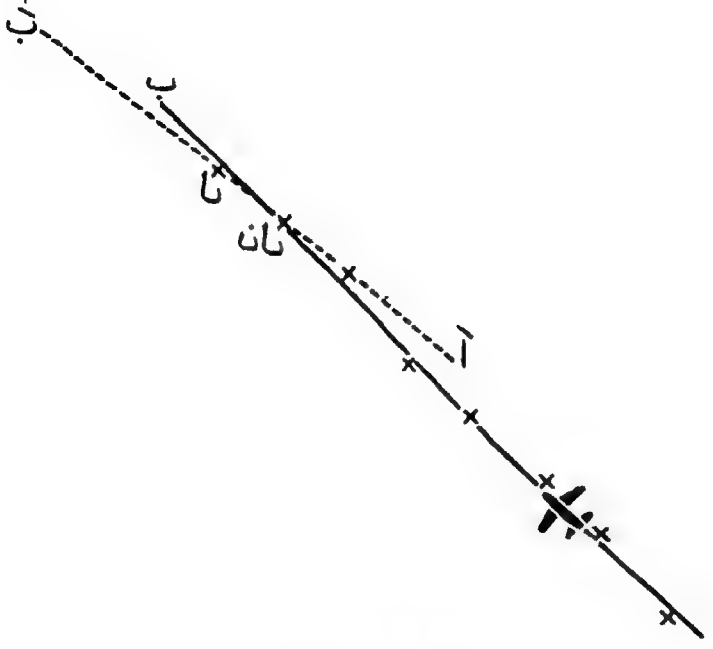
تتجسد أبسط أساليب التبادل بالنسبة للكمبيوتر في اعتبار كل النقاط واعطاء أوزان متساوية لها . إذا تصرف الكمبيوتر بهذه الطريقة وحاول ملائمة خط مستقيم لكل النقاط مأخوذة دفعة واحدة ، يحصل ربما على نتيجة كتلك الموضحة في الشكل ١١ - ٢ ، حيث قامت الطائرة بانعطاف عند النقطة هـ ، لذا فالمسار آ ب الذي حدده الكمبيوتر لا علاقة له بمسار الطائرة من وجهة النظر العملية .



الشكل ١١ - ٢

نستطيع معالجة هذه المشكلة بإعطاء أهمية أكبر للمعلومات الحديثة بالمقارنة مع المعلومات السابقة . وبسط طرق تطبيق هذه الفكرة هي طريقة التنبؤ الخطي . يعالج الكمبيوتر في التنبؤ الخطي كل معلومة على حدة ، ( والمعلومة هنا قد تكون بعد وجهة الطائرة بالنسبة لموقع الرادار ) حيث يضرب كل معلومة بعدد يتوقفه على حداثة هذه المعلومة ، إذ سيكون هذا العدد أكبر كلما كانت المعلومة أحدث . يجمع الكمبيوتر بعد ذلك كل هذه الجداءات وينتج بذلك نبوة على هيئة معلومة جديدة ، مثلاً بعد وجهة الطائرة بالنسبة للرادار عند لحظة لاحقة .

يمكن ان تكون نتيجة هذا التنبؤ وفق ما هو مرسوم في الشكل ١١-٣



الشكل ١١ - ٣

لقد تم هنا استخدام التنبؤ الخطي لحساب موقع وجهة متقدمين للطائرة كلما توفرت معلومة رادارية جديدة ممثلة في الشكل بإشارة x . وهكذا فمسار الطائرة المحسوب هو خط مستقيم ينطلق من الموقع المحسوب وفق الاتجاه المحسوب ، ويبقى هذا المسار معتمداً حتى ورود معلومة رادارية جديدة . نلاحظ ان الكومبيوتر يأخذ وقتاً طويلاً حتى يدخل في اعتباره حقيقة انعطاف الطائرة عند النقطة هـ ، رغم اننا أدركنا هذا الامر مباشرة عند رؤيتنا الموقع الذي يلي النقطة هـ .

يستخدم التنبؤ الخطي المعلومات السابقة بكفاءة عالية ، إلا ان استجابته للمعلومات الجديدة تتسم بكونها استجابة بطيئة ، علماً بان

هذه المعلومات ليست على اتساق مع سابقتها ، كالمعلومات التي حصلنا عليها في حالة الطائرة بعد انعطافها عند النقطة هـ . إذا حاولنا زيادة سرعة استجابة التنبؤ الخطي للمعلومات الجديدة ، فسننجح في ذلك ، إلا أننا سنقع في مطب آخر ، فالتنبؤ الخطي إذ ذاك لن يستخدم المعلومات القديمة بالكفاءة المطلوبة حتى لو كانت متسقة مع المعلومات الجديدة .

إن تحقيق التنبؤ الجيد حتى في حالة تبدل الظروف ، كما حدث عند انعطاف الطائرة ، يتم باستخدام التنبؤ غير الخطي ، وهذا النوع من التنبؤ يعتمد كل أساليب التنبؤ وليس فقط على ضرب المعلومة بعدد يتناسب مع قدمها ثم جمع الجداءات .

نورد فيما يلي مثالا بسيطا عن التنبؤ غير الخطي . نفرض أن لدينا متنبئين خطيين مختلفين ، يأخذ الأول بعين الاعتبار آخر مجموعة من المعلومات ثم تلقيها في حدود ١٠٠ معلومة ، بينما يعتبر الثاني العشرة الأخيرة من المعلومات فقط . نفرض أننا سنستخدم كل متنبئ على حدة لحساب ما ستكون عليه المعلومة التالية التي سترد ، ثم نقارن المعلومة الواردة فعلا بكلا التنبؤين . نصوغ معياراً للاختيار بين المتنبئين وفق ما يلي . نفرض أن المتنبئ الأول استطاع تقديم ثلاثة تنبؤات كانت أقرب للمعلومات الفعلية ، عندها نبنى هذا المتنبئ الأول ، وإلا فنفرض أن الطائرة تناور بطريقة تقلل وفقها من أهمية المعلومات القديمة ، ولا نجد عندها مناصاً من تبني المتنبئ الثاني . إن هذه الطريقة في الوصول إلى التنبؤ النهائي هي طريقة غير خطية ، إذ لم تتم صياغة التنبؤ بمجرد ضرب كل معلومة بعدد يتوقف على قدمها ، بل على العكس زدنا أو قللنا من اهتمامنا بالمعلومات القديمة وفق طبيعة المعلومات الجديدة .

وبشكل عام ، هناك عدد لا نهاية له من طرق التنبؤ غير الخطي وفي الواقع ، فالتنبؤ غير الخطي ومعه كل العمليات الأخرى الغير خطية ، هي المجموعة الشاملة لكل الطرق لتباعدة ، بعد استثناء أبسط الأساليب

اي التنبؤ الخطي والعمليات الخطية الاخرى . نعرف اليوم الكثير عن التنبؤ الخطي ، ولا نعلم بالمقابل إلا القليل عن التنبؤ غير الخطي .

اوردنا مثال التنبؤ بمواقع الطائرة لكي نمكن القارئ من تحسس الفكرة التي كانت ستبدو لا معنى لها لو عرضناها بشكلها المجرد . الا اننا مع ذلك نستطيع طرح المسألة الاعم .

لنتخيل عدداً من الاشارات الممكنة . يمكن أن تتكون هذه الاشارات من اشياء متباعدة كمسارات محتملة للطائرات أو كلمات مختلفة قد ينطق بها انسان ما ، ولنتخيل أيضاً بعض الضجيج أو التشويه ، فربما أن المعلومات الرادارية غير دقيقة بما فيه الكفاية ، أو أن الرجل يتحدث في غرفة مملأ بالضجيج . نطلب منا في هذا الوضع حساب بعض أوجه الاشارة الصحيحة : مثلاً : الموقع الحالي أو المستقبلي للطائرة ، الكلمة التي تفوه بها الانسان للتو أو التي سيتفوه بها بعد قليل . نستخدم معلوماتنا الاحصائية عن الاشارة لاتخاذ قراراتنا المناسبة ، ويمكن أن يكون من بين هذه المعلومات : المسارات الأكثر احتمالاً للطائرات ، أو عدد مرات الانعطاف وحدة كل انعطاف ، كما يمكن لهذه المعلومات الاحصائية أن تضم اصناف الكلمات الأكثر شيوعاً واحتمال ورودها بالنسبة لما يسبقها . نفرض أخيراً أن لدينا معلومات احصائية مشابهة عن الضجيج والتشويه .

يتضح اننا نستخدم هنا نفس نوعية المعلومات التي توظفها نظرية الاتصالات . الا اننا في نظرية الاتصالات نعتبر مصدراً للمعلومات وقناة ذات ضجيج ، ثم نبحت عن اميز طريقة لترميز الرسائل التي يولدها المصدر بغية بثها بأجود الشروط عبر القناة المفروضة ، أما في التنبؤ فننتقل من مجموعة من الاشارات شوهها الضجيج ثم نتسائل عن كيفية كشف الاشارة الفعلية ، أو حساب جانب منها أو التنبؤ به ، مثلاً كقيمة الاشارة عند لحظة مستقبلية .

يتألف الجهاز الرياضي للتنبؤ من النظرية العامة للتنبؤ الخطي التي أبدعها كولوموغروف ووينر ، الى جانب التحليل الرياضي لعدد من نوع خاص من المتنبئين اللاخطيين . أشعر أنني لا أستطيع المضي أبعد من هذه العبارة ، الا أننا لا نستطيع أن أقاوم اندفاعي لاعطاء مثال عن نتيجة نظرية اعتبرها مدهشة ، وقد صاغها سليبيان ، وهو رياضي طبعاً .

لنتخيل حالة إشارة خافتة قد تكون أو لا تكون محاطة بضجيج قوي . ومهمتنا أن نقرر فيما إذا كانت الإشارة موجودة فعلاً أم لا . يمكن أن يكون الضجيج والإشارة كمونات كهربائية أو انضغاطات صوتية . نفرض أن الضجيج والإشارة قد اتحدا بإضافة أحدهما للآخر بكل بساطة ، وأن كلاهما عبارة عن مصدر مستقر ولكل منهما حزمة تواتر محددة . نضيف أننا نعلم وبدقة طيف تواتر الضجيج ، أي بشكل أوضح ماهي نسبة طاقة الضجيج الواقعة في كل حيز صغير من مجال التواترات ، بينما طيف تواترات الإشارة مختلف عن ذلك . أثبت سليبيان أننا إذا استطعنا قياس الكمون الكلي أو ضغط الصوت للإشارة مع الضجيج وبشكل دقيق عند كل لحظة من أي فترة زمنية مهما كانت قصيرة ، نستطيع تحديد فيما إذا كانت الإشارة موجودة مع الضجيج أم لا وبدون خطأ يذكر ومهما كانت الإشارة خافتة . نشير الى أن هذه النتيجة هي نتيجة نظرية وليست مجرد تطبيق عملي مفيد . لقد كانت نظرية سليبيان هذه بمثابة الصدمة للكثيرين سيما أولئك الذين أكدوا أنه إذا كانت الإشارة ضعيفة بحد معين ، بل وحسبوا ذلك الحد ، فإنه لا يمكن كشفها بتفحص مجموع الإشارة والضجيج خلال أي فترة زمنية .

سأوضح ، قبل اغلاق هذا الموضوع العام ، لماذا ربطت به صفتي التنبؤ والكشف ، إضافة لصفتين أخريين هما الترشيع والتنعيم . إذا كان طيف التواتر للضجيج المختلط مع الإشارة مختلفاً عن طيف تواترات الإشارة ، أمكننا فصل الإشارة عن الضجيج باستخدام مرشح كهربائي يقطع التواترات السائدة في الضجيج بالمقارنة مع التواترات السائدة في الإشارة . إذا استخدمنا مرشحاً يقتلع كل أو معظم مركبات لتواتر

العالية التي تتغير بسرعة مع الوقت ، فاننا نحصل على خرج ابطأ في تغيّره بالمقارنة مع الدخل ، نقول عندها اننا قمنا بتنعيم مزيج الاشارة والضجيج .

تحدثنا حتى الآن عن جملة من العمليات نجريها على مجموعة من المعلومات بهدف حساب الاشارة الحاضرة او المستقبلية وكذلك كشفها . ويترتب على هذا الحساب و الكشف فعل ما ننوي القيام به .

من الممكن مثلاً ان ندفع طائرة صديقة لطائرة عدوة او نستخدم الرادار لمراقبة الطائرة العدو . يزودنا كل رصد جديد بمعلومات قد تجعلنا نغير خطتنا ازاء العدو .

تعرف الآلية المؤثرة على انها جهاز يعمل بشكل مستمر استناداً لقاعدة معلوماتية بهدف تحقيق غاية ما وضمن معطيات متغيرة . لدينا الآن عنصر هام جديد ، فالرادار يقيس موقع الطائرة المعادية بالنسبة لطايرتنا وهكذا تستخدم معلومات الرادار لتقرير التغييرات الضرورية في موقع طايرتنا . تغذى معلومات الرادار بشكل راجع يؤدي لتغيير معلومات الرادار التي سترد في وقت لاحق ، ذلك لان هذه المعلومات ستستخدم في تغيير موقع الطائرة الذي سيتم عنده استقصاء المعلومات الرادارية الجديدة . توصف التغذية الراجعة بكونها سلبية لانها تستخدم لانقاص الابتعاد المحتمل عن سلوك معين بدلاً من زيادته .

يمكننا ببساطة تصور امثلة اخرى عن التغذية الراجعة السلبية . يقيس منظم السرعة في الآلة البخارية سرعة تلك الآلة ، تستخدم القيمة المقاسة لفتح او اغلاق الصمام بحيث تتم المحافظة على السرعة عند حد معين . وهكذا تغذى نتيجة قياس السرعة بشكل راجع لتغيير تلك السرعة . يقيس الترموستات حرارة الفرن ويطفئ تبعا لذلك او يشعل اجهزة التدفئة بحيث يحافظ على درجة حرارة ثابتة للفرقة — عندما يمشي احدنا وفي يديه صينية فيها ماء ، قلنه يجنح الى مراقبة الماء



وموازنة الصينية بحيث لا ينسكب الماء ، إلا أن لهذا نتائج سيئة ، فكلما أمال صديقنا الصينية بهدف منع انسكاب الماء تحرك الماء بشكل أعنف في الصينية . عندما نطبق التغذية الراجعة لتغيير عملية بالاستناد الى حالتها الملاحظة يصبح وضعها برمته غير مستقر ، بكلمة مختصرة بدلاً من انقاص الانحرافات الصغيرة بالنسبة للهدف المرسوم ، يمكن أن تؤدي التغذية الراجعة لزيادة تلك الانحرافات .

ان هذا مشوش للغاية في حالة داربات التغذية الراجعة . اذا أردنا جعل التصحيحات أكثر كمالاً علينا تقوية التغذية الراجعة . إلا أن هذا يفضي بدوره لعدم استقرار الجملة ، والجملة غير المستقرة ليست مرغوبة كما هو معلوم ، إذ أن مثل هذه الجملة قد تفضي الى سلوك مشابه لابتعاد الصاروخ عن الطائرة المعادية بدلاً من ملاحقتها ، ولانخفاض درجة حرارة الغرفة وارتفاعها على شكل قفزات ، أو لاسراع آلة معينة وتوقفها وأخيراً لبث أغنية ما من مضخم دون تغذية ذلك المضخم بأي دخل .

لقد درس استقرار أنظمة التغذية الراجعة السلبية بعناية فائقة ، وقد تم تحصيل كم معلوماتي كبير من هذه الأنظمة ، حيث تسلي السعة الحالية مجموع السعات السابقة مضرورية بأعداد تتناسب مع البعد الزمني لتلك السعات عن اللحظة الراهنة .

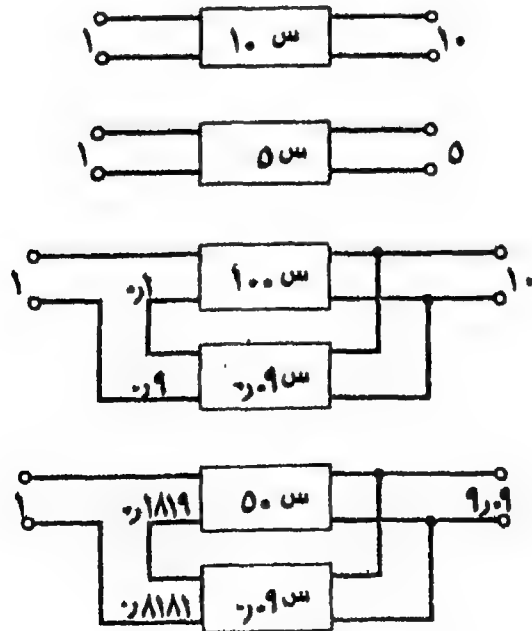
تتسم أنظمة التغذية الراجعة السلبية بكونها إما مستقرة أو غير مستقرة وذلك بصرف النظر عن الاشارات المغداة اليها . أما أنظمة التغذية الراجعة غير الخطية فيمكن أن تكون مستقرة لبعض أنواع الدخول وغير مستقرة لأنواع أخرى . تمثل السيارة القديمة غير المتماسكة والمرتجفة نظاماً لا خطياً ، إذ يمكن أن تكون حركتها مستقرة على طريق سوي ناعم ، إلا أن تنوءاً صغيراً قد يصادفها سيجعلها ترتجف وسيستمر ذلك الارتجاج حتى بعد تجاوزها للتنوء بمسافة طويلة .

لقد غطى معظم الجهد النظري المبذول في مجال أنظمة التغذية الراجعة السلبية ، قطاعاً آخر من الموضوع لم نتطرق إليه بعد ويتعلق بجهاز

اخترعه هارولد بلاك عام ١٩٢٧ يعرف باسم المضخم ذي التغذية الراجعة السلبية .

يعرف مردود المضخم على انه نسبة كمون الخرج الى كمون الدخل .  
تبرز اهمية خاصة لاستخدام مضخمات ذات مردود ثابت في الهاتف وفنون الالكترونيات الاخرى ، الا ان الانابيب المفرغة والترانزستورات هي اجهزة غير كاملة اذ يتغير مردودها مع الوقت كما يتوقف ذلك المردود على قوة الاشارة . تلعب المضخمات ذوات التغذية الراجعة السلبية دوراً أساسياً في التقليل من اثر هذه التغيرات في مردود الترانزستورات والانابيب المفرغة .

يتضح لنا سبب ذلك من خلال تفحص الشكل ١١ - ٤



الشكل ١١ - ٤

لدينا في الأعلى مضخم عادي مردوده عشرة ، أي إذا طبقنا كمون  
دخل مقداره ١ فولط على اليسار ، نحصل على كمون خرج مقداره ١٠  
فولط على اليمين . نفرض أن المردود انخفض إلى النصف ، نحصل  
بذلك على كمون خرج مقداره ٥ فولط كما هو مبين في القسم التالي من  
نفس الشكل .

يوضح القسم الثالث من الشكل مضخماً ذا تغذية راجعة سلبية صمم  
لتحقيق مردود قدره عشرة . وهو يتألف من علبتين ، العليا هي مضخم  
مردوده مئة يربط خرجه إلى علبة تقسيم كمون دقيقة للغاية لا تحتوي  
على ترانزستورات أو أنابيب ولا تتغير بتغير الوقت أو تغير مستوي  
الإشارة . يتألف دخل العلبة العليا من كمون الدخول ١ فولط مطروحاً  
منه خرج العلبة السفلى وهو يسوي جدار ٩٠ ر. في كمون الخرج ١٠  
فولط أي ٩ ر. فولط .

نفرض الآن أن الانابيب أو الترانزستورات في العلبة العليا تتعرض  
للتغير ، بحيث تعطي العلبة مردود خمسين بدل المردود السابق المساوي  
لمئة ، يوضح القسم الأخير من الشكل هذه الحالة . نشير إلى أن الأرقام  
المعطاة فيه هي مجرد أرقام تقريبية ، إلا أن الملاحظة المطلوبة هي أن  
انخفاض المردود إلى النصف لم يؤثر على الخرج بأكثر من ١٠ ٪ ، ولو  
كان هذا المردود أعلى لكان الأثر على الخرج أقل .

لا يمكننا التقليل من أهمية التغذية الراجعة السلبية إطلاقاً ،  
فالمضخمات من هذا الطراز هامة في الاتصالات الهاتفية ، كما أن  
الترموستات مثال حي على نجاعة استخدام هذه التغذية . تستخدم  
التغذية الراجعة السلبية للتحكم في العمليات الكيميائية في المصانع و في  
متابعة الصواريخ للطائرات المعادية . كما أن الطيارين الآليين على متن  
مختلف أنواع الطائرات يستفيدون من التغذية الراجعة السلبية في  
الحفاظ على الطائرة ضمن مسار معين .

ويشكل أكثر عمومية ، استخدام التغذية الراجعة السلبية من ميني الى يدي لتوجيه القلم أثناء الكتابة ، وكذلك من أذني اليسى لسنني وشفتي لتعلم الكلام أو تقليد صوت آخر . تستخدم عضوية الحيوانات التغذية الراجعة السلبية بأشكال مختلفة ، وهذا مثلاً ما يجعلها تحافظ على درجة حرارة ثابتة في داخلها رغم تقلبات الطقس حولها ، وكذلك يمكنها من تثبيت الخصائص الكيميائية للدم والنسج . يطلق على قلبية الجسم للاحتفاظ بقطاع محدد من الخصائص رغم تغير المحيط اسم التوازن البدني .

يعد ج. روس . آشي واحداً من كبار علماء السيبرنيتيك ، وقد كان معلم نفسه . بنى آشي آلة دعاها موازن البدن لعرض ظواهرات الموازنة مع البيئة التي يعتقد أنها تشكل الميزة الأولى للحياة . وقد زودها بعدد من دارات التغذية الراجعة وواسطتين لتغييرها ، يتحكم في واحدة منها الموازن البدني ، بينما يتحكم في الأخرى الشخص الشرف على تشغيل الآلة والذي يلعب دور البيئة . إذا تغيرت دارات الآلة استجابة للبيئة بحيث تصبح في حالة عدم استقرار ، فإن الآلة لا تلبث أن تعيد ضبط الدارات بالمحولة والخطأ بهدف العودة الى الاستقرار مرة ثانية .

يمكننا اذا شئنا تشبيه سلوك الموازن البدني هذا بحالة طفل يحاول تعلم المشي دون أن يقع ثم تعلم قيادة الدراجة دون أن ينقلب وكذلك بحالات أخرى كثيرة نعرض لها في حياتنا . يؤكد وينر في كتابه « السيبرنيتيك » على دور التغذية الراجعة السلبية كعامل هام للتحكم العصبي ، كما يؤكد أن بعض الاعاقات كارتجاج الايدي تسبب مباشرة عن اضطراب نظام التغذية الراجعة السلبية في الجسم .

مرضنا حتى الآن ثلاثة مكونات للسيبرنيتيك : نظرية المعلومات ، الكشف والتنبؤ بما في ذلك التنعيم والترشيح ، وأخيراً التغذية الراجعة السلبية متضمنة الآليات المؤازرة والمضخات ذوات التغذية الراجعة السلبية . نقرن عادة اجهزة الكمبيوتر والادوات المعقدة الأخرى المشابهة

مع السيبرنيتيك . تستخدم كلمة الامة احيانا للاشارة الى هذه الالات المتقدمة .

يمكن للباحث ان يجد للتكنولوجيا المعاصرة جذورا في انجازات القرون الغابرة ، الا ان دراسة تلك الاصول لن تقدم الكثير على صعيد فهم هذه التكنولوجيا . يتعلم الانسان بالعمل ومن خلال التأمل بما عمله . لقد زادت امكانيات العمل في حقل الالات المعقدة بشكل لم يسبق له مثيل بالمقارنة مع الزمان السالفة كما ان معرضات التفكير قد تنامت الى حدود لا يمكن الاحاطة بها .

ان تقني الآثار التاريخية للالات المعقدة يصل بنا الى المقاسم الهاتفية الآلية التي شاهدت النور لأول مرة في النصف الثاني من القرن الماضي ، وكانت تلك المقاسم بدائية تعمل بأسلوب الخطوة - خطوة حيث تعتمد آلية محددة لتوضيع قطاع معين من حلقة الاتصال الهاتفية كلما تم تسجيل أحد مكونات الرقم الهاتفي الذي ننوي مخاطبة صاحبه . تطورت هذه المقاسم الى أنظمة التحكم الشاملة ، حيث لا تشغل الأرقام قواطع المقسم بشكل مباشر ، اذ يخزن الرقم أولا أو يمثل كهربائيا أو ميكانيكيا في أحد أجزاء المقسم . تختبر بعد ذلك آلية كهربائية في جزء آخر من المقسم الدارات الكهربائية التي يمكن استخدامها لوصل طالب المخابرة بالرقم المطلوب حتى يجد واحدة غير مشغولة يستخدمها لتحقيق الاتصال المنشود .

تتسم المقاسم الحديثة بتعقيد بالغ وحجوم كبيرة ، اذ تصمم أصلا لوصل كل مدن وقرى قطر معين ببعضها في شبكة اتصال مباشر ، لذا تعد هذه المقاسم قمة التكنولوجيا التي أبدعها الانسان ويستدعي وصف جزء من عملها عددا كبيرا من الكلمات . ان ادارة قرض التلفون تعني اليوم البحث عن أكثر الخطوط اقتصادية لاستخدامه في وصل الطالب بالرقم المنشود ، وربما في عملية التفاف حول العديد من المدن اذا كان معظم الخطوط مشغولا . وما يفعله المقسم بعد تحقيق الاتصال هو

توقيت المخابرة وقياس مدتها وتحديد أجرتها تبعاً لذلك ، كما أنه سيفصل كل الدارات المرتبطة إذا قطع أحد الفريقين المخابرة ، وما هو أهم من ذلك أن المقسم يبلغ كومبيوتراً مركزياً عن الأعطال التي قد تحدث فيه ، ويستمر بالعمل رغم حدوث تلك الأعطال .

لعل من أهم مكونات المقاسم الهاتفية العناصر المعروفة باسم الحاكمت الكهربائية . تتألف الحاكمة الكهربائية من مغناطيس كهربائي ذي نواة مغناطيسية تقف قبالتها رقاقة معدنية صغيرة متحركة تغلق في أحد اتجاهي حركتها دائرة كهربائية عندما تمس قطعاً أخرى ثابتة ( على غرار آلية عمل الجرس الكهربائي ) . عندما يمر التيار الكهربائي في وشيعة المغناطيس الكهربائي ، تنجذب الرقاقة المغناطيسية وتحرك ، وتكون النتيجة أن بعض الرقاقات المتحركة تبتعد عما يقابلها من القطع الثابتة فتفتح قسماً من الدارات ، بينما تقترب رقاقات متحركة أخرى من قطع ثابتة مقابلة وتغلق قسماً آخر من الدارات .

طبق ج. ر. ستيتيز من شركة بيل في الثلاثينات من هذا القرن تكنولوجيا الحاكمت والمركبات الأخرى للمقاسم الهاتفية في بناء آلة حاسبة كبيرة كان بإمكانها تنفيذ العمليات الحسابية الأربعة مهما بلغت من التعقيد . تابعت شركة بيل إنتاج أجهزة الكومبيوتر وفق نفس الأسس أثناء الحرب العالمية الثانية لأغراض عسكرية . أما هوارد ايكن وزملاؤه فقد بنوا أول كومبيوتر يعتمد الحاكمت الكهربائية في جامعة هارفارد عام ١٩٤١ .

أتت الخطوة الأساسية في زيادة السرعة لأجهزة الكومبيوتر بعد فترة قصيرة من الحرب على يد ج. ب. ايكرت وج. و. موشلي اللذان بنيا جهازايناك وهو كومبيوتر يعتمد الانابيب المفرغة ، وقد حلت مؤخرًا الترانزستورات والدارات المتكاملة محل الانابيب المفرغة في بناء أجهزة الكومبيوتر .

وهكذا فقد كانت الفترة الحاسمة من تاريخ الآلات المعقدة هي فترة تحقيقها وتصنيعها ، أولاً باستخدام الحاكمات ومن ثم باستخدام الانابيب المفرغة والترانزستورات .

لم يتحقق بناء الاجهزة المعقدة عند توفر العناصر المطلوبة وحسب ، بل كان من الواجب رسم المخططات السليمة لربطها ببعضها بغية تنفيذ مهمات معينة كالتقسيم والضرب . كان من أهم أعمال ستيببيتز وشاتون تطبيق جبر بول ، وهو فرع من المنطق الرياضي ، على توصيف وتصميم الدارات المنطقية .

وهكذا فقد تكامل بناء الآلات المعقدة الهادفة لحل مشاكل معينة بتوفير المركبات المناسبة وابداع التصميم المتكررة لربطها ببعضها . ان التنظيم ، وهو جوهر الآلة ، اساسي وحاسم ، الا ان الآلة لم تكن لتوجد لولا تصنيع مكوناتها .

كانت الآلة الحاسبة التي بناها ستيببيتز بلا روح ، اذ كلن المشغل يغذيها بزواج من الاعداد العقدية فتهتز وترتجفه ، ثم تستجيب باعطائه المجموع ، الفرق ، الجداء ، أو حاصل القسمة . الا انه استطاع عام ١٩٤٣ تصنيع كومبيوتر باستخدام الحاكمات ، كان يتلقى التعليمات ( أي البرنامج ) بواسطة شريط ورقي طويل ، وكان هذا البرنامج يتضمن العمليات المطلوب اجرائها والاعداد التي ستجري عليها هذه العمليات .

تحققت خطوة متقدمة في الكومبيوتر عندما أصبح بالإمكان الاستعانة بقسم سابق من شريط البرنامج لاكمال مهامه ، أو استخدام شريط برنامج جانبي للمساعدة في حساباته . لقد أصبح بإمكان الكومبيوتر في هذه الحالة اتخاذ قرار ما عند بلوغه نقطة معينة ، ومن ثم متابعة العمل استناداً لهذا القرار . نفرض ان الكومبيوتر كان يصدد حساب المتسلسلة التالية : وذلك باضافة حدودها حداً لآخر حد :

$$1 - \frac{1}{3} + \frac{1}{5} - \frac{1}{7} + \frac{1}{9} - \frac{1}{11} + \dots$$

يمكن ان نبرمج الكمبيوتر بحيث يتابع اضافة الحدود حتى يقابل حداً اقل من  $\frac{1}{1000000}$  ويطبع المجموع عند ذلك ثم ينصرف الى حسابات اخرى . يتخذ الكمبيوتر قران بطرح آخر حد قام بحسابه من  $\frac{1}{1000000}$  ، فاذا كانت النتيجة سالبة قام بحساب حد جديد واضافه الى المجموع السابق ، اما اذا كانت النتيجة موجبة طبع المجموع اذ ذاك على الشاشة وانتقل الى الجزء التالي من البرنامج لمتابعة بقية التعليمات .

اقرنت الفقرة الكيفية الكبيرة التالية في تطوير اجهزة الكمبيوتر باسم جون فون نويمان الذي وسع استخدام اجهزة الكمبيوتر الاولى في حسابات تتعلق بالتنبال الدورية . لقد امتلكت ، حتى اجهزة الكمبيوتر الاولى ، مخازن او ذاكرات ، تحفظ فيها وبشكل مؤقت النتائج المتوسطة للحسابات التي لا تلبث ان تستخدم في اكمال هذه الحسابات ، كما تحتفظ تلك الذاكرات بالنتائج النهائية تمهيداً لطبعمها . طرح فون نويمان فكرة خزن البرنامج في ذاكرة الكمبيوتر بدلاً من تغديته به على شريط ورقي . لقد جعل ذلك التعليمات في متناول الآلة ، كما مكنها من تغيير بعض هذه التعليمات بناء على نتائج الحسابات المرحلية .

كانت الأرقام العشرية تخزن في الآلات الحاسبة القديمة على دواليب مسننة صمم كل منها ليأخذ عشرة اوضاع مختلفة . اما اليوم فتحفظ الآلات الحاسبة الحديثة واجهزة الكمبيوتر بالأعداد في صيغتها الثنائية ضمن صفوف عديدة من الدارات المتكاملة . تقتضي المحافظة على المعلومات ضمن هذه الدارات توفير مصادر دائمة للتيار الكهربائي وبكميات قليلة ، يدمى تخزين المعلومات بهذا الأسلوب ، التخزين السريع الزوال ، لأن انقطاع التيار الكهربائي يمحو المعلومات من الذاكرة . يمكننا رفع



الوثوقية من تخزين المعلومات بزيادة الاجراءات الكفيلة بمنع انقطاع او اضطراب التيار الكهربائي .

إن الطراز القديم للذاكرات كان يحافظ على المعلومات رغم انقطاع التيار .. اذ كانت الذاكرة تتألف بشكل رئيسي من مغناط حلقية تخترقها جملة من الاسلاك الكهربائية ، و كانت تلك المغناط توضع في صفوف متوازية ، وتمثل جهة تمغنت الحلقة رقما ثانياً معينا .. إن انقطاع التيار لا يؤثر على تمغنت الحلقات ، لذا تبقى المعلومات كما هي لدى هذا الانقطاع ، اللهم إلا اذا حدث تشويش معين في التيار أدى الى تغيير بعض اتجاهات التمغنت بشكل خاطيء ، مما يتسبب في الاحتفاظ بمعلومات خاطئة . دعيت هذه الذاكرات لدى اختراعها بالذاكرات المركزية .

توصف الذاكرات المركزية وذاكرات الدارات المتكاملة بأنها ذاكرات عشوائية التناول .. إذ يمكن استرجاع أي زمرة من الأرقام الثنائية من الذاكرة في جزء من الميكروثانية ( الميكروثانية جزء من مليون من الثانية ) بمجرد تغذية الذاكرة بزمرة أخرى من الأرقام الثنائية هي العنوان من الذاكرة حيث تقبع الزمرة المنشودة . ترصف الأرقام الثنائية عادة في زمر مكونة من ثمانية أرقام تسمى بايت ، أو ستة عشر رقماً تدعى كلمة .

كانت الأرقام الثنائية تخزن ، في أيام الكمبيوتر الأولى ، على هيئة ثقوب في شريط وراق ، أما الآن فتخزن وفق تشكيلات مغناطيسية بالفة الدقة على اشرطة أو اقراص مغناطيسية .. وهكذا نشاهد الكاسيتات الشبيهة بكاسيتات آلات التسجيل في أجهزة الكمبيوتر الصغيرة والشخصية ، اذ توفر هذه الكاسيتات بيئة رخيصة لتخزين المعلومات . يوصف تخزين المعلومات على الاشرطة أو الاقراص المغناطيسية بكونه تسلسلي ، إذ حتى نصل معلومة معينة نرغب بالتعامل معها ، لا بد أن نتجاوز كل ما سبقها من المعلومات . وهكذا فالتخزين التسلسلي ابطا بكثير من التخزين العشوائي ، وهو يستخدم لخزن كمية كبيرة من

المعلومات ، أو لخزن البرامج والمعلومات التي تنقل وبشكل متكرر الى ذاكرات التناول العشوائي . تستخدم الاشرطة المغناطيسية في حفظ نسخة اضافية عن كل البرامج والمعلومات الهامة كإجراء احتياطي في حال إصابة ذاكرة التناول العشوائي أو الأقراص المغناطيسية باعطال قد تؤدي للإساءة الى المعلومات المتوضعة في هذه الأوساط .

تضم أجهزة الكمبيوتر إضافة للذاكرة والتخزين ، وحدات الحساب التي تنفذ كل العمليات الحسابية والمنطقية وتتابع تعدادها . ووحدة التحكم التي تضبط تدفق التعليمات وتنفيذها وكذلك الاتصال بأجهزة الإدخال والإخراج ، كما يكمن أن يضاف الى الكمبيوتر وحدات أخرى لتنفيذ مهمات خاصة كتحويل فورييه وقلب المصفوفات وغيرها .

يتوجب على مستخدم الكمبيوتر الذي يرمي لإجراء عمليات محددة، حتى لو كانت بقصد التسلية ، أن يكتب برنامجاً مفصلاً يتطلع من خلاله الكمبيوتر على أدق التفاصيل المتعلقة بتلك العمليات . كان المبرمجون الأوائل يتدلون جهوداً جبارة لتحقيق ذلك ، إذ كما هو معلوم يتعامل الكمبيوتر داخلياً مع الأرقام الثنائية ، لذا كان على هؤلاء كتابة البرامج بالترميز الثنائي مباشرة .

إلا أن الكمبيوتر يمكن أن يترجم سلاسل الأحرف والأرقام العشرية الى سلاسل مقابلة من الأرقام الثنائية وفق قواعد معينة . كما يمكن كتابة برامج جزئية تحفظ لتنفيذ مهام جزئية غير ملحوظة في مبنى الكمبيوتر الرئيسي ، مثلاً حساب مساحات نموذجية مطلوبة على الدوام في الأعمال الطبوغرافية . لذا تم تطوير اللغات التجميعية والتي يطلق عليها أيضاً اسم لغات الآلة ، وهي تقع في مرحلة متوسطة بين التهج الثنائي الذي يتبعه الكمبيوتر في داخله ، وبين لغات البرمجة المتقدمة التي يتعامل مستخدم الكمبيوتر بموجبها مع الكمبيوتر .

عندما يكتب المبرمج برنامجاً بالغة التجميعية ، عليه أن يكتبه في خطوات متتالية ، كما أنه يستطيع تحديد مجموعات الخطوات الجزئية التي على الكمبيوتر اتباع أي منها في حال تحقق شرط ما أو عدم تحققه ، ككون نتيجة ما أكبر أو أصغر أو مساوية لقيمة أخرى . إلا أن الأرقام التي يكتبها في مثل هذا البرنامج هي أرقام عشرية ، كما أن التعليمات بسيطة في شكلها مما يسهل عملية استذكارها ، مثلاً كتليمة CLA وهي اختصار CLEAR ADD ، أي تخلية وجمع ، ويعني ذلك وضع العدد صفر في المراكز ثم إضافة العدد الموجود في عنوان معين من الذاكرة إلى هذا المركز .

لا شك أن كتابة البرنامج بلغة الآلة ، أي باللغة التجميعية هي عملية متعبة للغاية . تتسم أجهزة الكمبيوتر بأنها عملية لأن لها أنظمة تشغيل يمكن للكمبيوتر من خلالها وباستخدام عدد بسيط من التعليمات أن يقرأ المعلومات ويطبّعها وأن يؤدي وظائف أخرى ، والسبب الرئيسي في ذلك أن برامج الكمبيوتر تكتب عادة بلغات البرمجة المتقدمة ، وحتى أنظمة التشغيل تكتب بهذه اللغات .

يزداد عدد لغات البرمجة المتقدمة في كل يوم ، ومن أهم هذه اللغات هي لغة الفورتران FORTRAN ، وهي منحوتة بالأجنبية من كلمتين : FOR من FORMULA أي العلاقة بين بعض المتغيرات ، وTRAN من TRANSLATION أي ترجمة ، وهي من أقدم لغات البرمجة وأكثرها دواماً ، وتستخدم بشكل رئيسي في التطبيقات العلمية ، وإكمال على تعليمة وفق هذه اللغة ، نورد التعليمة التالية :

IF Z < 80 GOTO 7

ويعني ذلك أنه إذا كانت قيمة المتغير Z أقل من 80 فعلى الكمبيوتر أن يترك التنفيذ المتسلسل لتعليمات البرنامج وأن يقفز إلى الموقع من البرنامج المحاذي للرقم 7 . أما إذا كان Z أكبر أو يساوي 80 فيتابع الكمبيوتر تنفيذ البرنامج وفق التسلسل الطبيعي لتعليماته .

تعتبر لغة الباسيك أبسط من لغة الفورتران ، لذا فهي أوسع انتشاراً . أما لغة البرمجة المسماة بالأجنبية C فتستخدم بشكل رئيسي في كتابة أنظمة التشغيل والحسابات العددية . واقع الأمر أن لغات البرمجة تجنح نحو البساطة عندما تصمم لتحقيق أغراض معينة كالحسابات العددية أو معالجة النصوص اللغوية وكذلك تمثيل الجمل الكهربائية أو الميكانيكية أو الاقتصادية . تقاس البساطة هنا بزمان تشغيل الكمبيوتر اللازم لإداء إحدى هذه المهمات .

يحوّل البرنامج من صيغته المكتوبة بإحدى لغات البرمجة المتقدمة الى لغة الآلة باستخدام نظام إضافي يسمى المترجم وهو ينفذ هذا التحويل على مجمل البرنامج دفعة واحدة ، وهناك نظام من نوع آخر يحول البرنامج سطراً بعد سطر ، يطلق على هذا النظام اسم المفسر والمترجمات أكثر فعالية وشيوعاً . ينصاحب إدخال البرنامج الى الكمبيوتر تشغيل برامج أخرى تجهز بها أجهزة الكمبيوتر بشكل مسبق ومهمتها تصحيح أخطاء الإدخال دون الحاجة لإعادة إدخال كامل التعليمات التي حصل فيها الخطأ .

ينتشر تعلم البرمجة اليوم في كل الأوساط بدءاً من الأطفال المدارس الابتدائية حتى طلاب الجامعات مروراً بالمراحل الثانوية ، كما تشترط كل الجامعات على المتقدمين للحصول على شهادة الدكتوراه بمختلف الفروع ، أن يلموا إلماماً جيداً بالكمبيوتر والبرمجة .

يدخل استخدام الكمبيوتر قطاعات جديدة من الحياة في كل يوم ، كما أصبح جزءاً لا يتجزأ من قطاعات أخرى كفضاء الفضاء وصنع السيارات ومتابعة عمل المصانع الكيميائية وجرد المستودعات وحجز الأماكن في الفنادق ومكاتب السفريات وتشكيل الطيوف الثلاثية الأبعاد وإخراج الأفلام السينمائية ولعب المباريات وقراءة النصوص وتأليف الأعمال الموسيقية السيئة بالطبع والخالية من أي مضمون إنساني . وأعداد أخرى من التطبيقات يضيق المجال عن ذكرها هنا . استطاعت تكنولوجيا الدوائر المتكاملة توسيع قاعدة الانتاج لأجهزة الكمبيوتر لدرجة دخل معها الكمبيوتر كل بيت وأصبح وسيلة ناجعة للتسلية .

تتسم علوم البرمجة بسهولة تعلمها حتى من قبل الأطفال ، إلا أن أعداد البرامج الهادفة لحل مشاكل معينة هي مهمة صعبة للغاية ، وتزداد صعوبة هذه المهمة كلما كان الكمبيوتر أصغر حجماً .

تنفق اليوم أموال طائلة لأعداد البرامج الطويلة والمعقدة ، ربما أكثر مما تنفق على تحسين الأجهزة ذاتها . يستطيع مبرمج حلاق إعداد برنامج قصير ينفذ وظائف معينة بينما قد يتعثر آخرون في أعداد برنامج مماثل . ويكاد يكون معيار استخدام الكمبيوتر وجود المبرمج الجيد قبل وجود الكمبيوتر الجيد ، ولأننا فر أعداد كافية من المبرمجين المهرة لتغطية الاحتياجات الواسعة لاستخدام الكمبيوتر في مختلف المجالات .

وبرغم ذلك فقد فشل أبرع المبرمجين في جعل الكمبيوتر ينفذ أعمالاً محددة . يقوم الكمبيوتر بكل ما يطلب منه ، بشكل أدق لا يستطيع الكمبيوتر القيام بوظائف لا يفهم المبرمج أصلاً فحواها وكل تفاصيلها تستغرق الحسابات الإلكترونية في كثير من الأحيان وقتاً طويلاً وتكلف مبالغ كبيرة ، ولكن في كثير من الأحيان نجد أنفسنا عاجزين عن استخدام الكمبيوتر لمهمة معينة . أما عن أهم المشاكل التي لم نستطع حلها حتى الآن باستخدام الكمبيوتر فهي في واقع الأمر كثيرة ونعد منها : طباعة الكلام المنطوق والترجمة من لغة لأخرى وبرهان نظريات رياضية متقدمة وتأليف موسيقى ممتعة .

سمى الكثيرون لحل بعض أو كل المشاكل التي أشرنا إليها ، وقد أدى ذلك إلى بروز أبحاث جديدة وهامة تتعلق بتفاصيل هذه المشاكل وما يترتب عليها ، كتمييز الأحرف المكتوبة ، بناء اللغة ، استراتيجيات الألعاب ، أسس التأليف الموسيقي ، ونظريات البرهان الرياضي .

أدى التصدي لحل المشاكل المعقدة وغير العادية على الكمبيوتر إلى تعميق فهمنا لعملية الإدراك . وهكذا إذا تحدث أحد العلماء المعاصرين عن أحاطته بالسلوك الإنساني في ظروف معينة أو علمه بطريقة حل مسألة رياضية أو منطقية معينة ، فما يحدث في أغلب الأحيان هو أن يحاول

ذلك العالم اثبات ما ذهب اليه بتصميم برنامج للكمبيوتر يمثل السلوك المعنى أو يغطي تفاصيل البرهان المنشود. أما إذا لم يستطع هذا الدارس توظيف الكمبيوتر في أبحاثه ، فسيبقى فهمه لموضوع بحثه غير كامل . أو ربما غير حقيقي ومضللاً .

هل سيتمكن الكمبيوتر من التفكير ؟ لا نستطيع ان نربط معنى محدداً بهذا السؤال إذا لم نفهم أولاً ما نقصده بكلمة تفكير . يعرض ملارفن مينسكي ، وهو رياضي متميز له اهتمامات كبيرة في مجال أجهزة الكمبيوتر واستخدامها ، الحوار القصير التالي . يتحدث الناس عن لاعب شطرنج قدير يغلب كل اللاعبين الآخرين بقولهم: « يا له من عبقرى فد ، يا لعظمة المخ الذي يمتلكه ، انه مفكر كبير فعلاً » . يوجه السؤال التالي الى هذا اللاعب : « كيف تستطيع هزم كل خصومه في اللعب » ، فيجيب : « لدي قواعد معينة اطبقها في الانتقال الى اللعبة التالية » . يعلق المستمعون بسخط « إن هذا ليس تفكيراً إطلاقاً ، فنحن نزاء عملية ميكانيكية محضة » .

يرغب مينسكي من ذلك ان يؤكد ان الناس يجنحون الى تعريف التفكير على أنه تلك العمليات التي تستعصي على فهمهم . ساذب أبعد من ذلك واقول إن الكثيرين يعتبرون عملية تفكير أي خلط للكلمات الهامة في صيغ إعرابية مقبولة . أعمد في بعض الحالات لحل مشاكل فكرية الطابع رغم انها ميكانيكية في فحواها . على كل حال يبدو ان الفلاسفة والمفكرين سيثابرون على تبني تعريف للتفكير يكون التفكير بمقتضاه كل ما تعجز الآلة عن عمله في مرحلة معينة . لن يسبب هذا التعريف لي أي ازعاج سيما إذا اكن مبهجاً لأصحابه ، وان كنت اعتقد انه يستحيل من حيث المبدأ التفريق بين ما يمكن للإنسان عمله وما يمكن بالمقابل للآلة ان تعمله ، حتى عند اعتبار ما طرحه العالم الرياضي البريطاني تيورينغ عام ١٩٣٦ عن لعبة التقليد .

يُسند الدور الرئيسي في هذه اللعبة الى باحث يكون على صلة بإنسان ويكمبيوتر عن طريق لوحتي أزرار، إلا أنه لا يدري أي اللوحتين

ترتبط بالإنسان أو الآلة . يحاول هذا الباحث اكتشاف صلة كل من اللوحتين بطرح الأسئلة ، وقد تمت برمجة الكمبيوتر بهدف خداع الباحث . ان نجاح اللعبة المتجسد بتضليل الباحث تماماً يتجاوز امكانيات الكمبيوتر والبرمجة في العصر الحاضر ، ويحتاج ربما لعدة مئات من السنين ، وقد لا يكون من الممكن تحقيقه أبداً .

رأينا ان السيبرنيتيك هو مجال بالغ السعة ، فهو يتضمن نظرية الاتصالات التي افردنا لها كتاباً كاملاً ، كما يتضمن التنبؤ والتنعيم البالغي الاهمية في التطبيقات الرادارية والعسكرية ، فوفق وينر ، عندما نحاول تحديد الموقع الحقيقي لطائرة سواء في اللحظة الراهنة او في المستقبل إنما نتعامل في هذه الحالة مع السيبرنيتيك . وكذلك نكون على احتكاك مع السيبرنيتيك عندما نستخدم مرشحاً كهربائياً لفصل الضجيج من تواتر معين عن الإشارة من تواتر مختلف .

تراکز انجلز وينر في هذا المجال الواسع ، وكان عمله الكبير النظرية العامة للتنبؤ الخطي حيث يتم التنبؤ بضرب كل معلومة برقم يتناسب عكساً مع قدمها ثم جمع النتائج .

اما المكونة الأخرى للسيبرنيتيك فهي التغذية الراجعة السلبية . يعمل الترموستات وفق هذه التغذية عندما يتابع درجة الحرارة في غرفة ويطفئ أو يشعل تبعاً لذلك جهاز تدفئة للحفاظ على درجة حرارة ثابتة في الغرفة ، كذلك شأن الطيارين الآليين عندما يديرون أجهزة الطائرة لتثبيت ارتفاع الطائرة وجهة طيرانها . وأخيراً يستخدم بنو البشر التغذية الراجعة السلبية للتحكم بحركة أيديهم أثناء قيامهم بالأعمال المختلفة .

قد تكون أجهزة التغذية الراجعة السلبية غير مستقرة ، اذ يمكن ان يؤدي الخرج أحياناً لإبعاد السلوك وبشكل كبير عن الهدف المنشود . يعزو وينر الارتجاج لدى الإنسان وبعض أمراضه الأخرى الى خلل في آلية التغذية الراجعة السلبية لديه .

تستخدم التغذية الراجعة السلبية أيضاً في توفير شكل إشارة الخرج الكبيرة من مضخم مع إشارة الدخل الصغيرة . لقد كان لهذه التغذية أهميتها القصوى في نظرية الاتصالات قبل ظهور السيبرنيتيك .

أبرز السيبرنيتيك أهمية الأتمتة المتمثلة بالآلات المعقدة كمقاسم الهاتف التي انقضى على ظهورها فترة طويلة ، وأجهزة الكمبيوتر التي وضعت في الاستخدام بعد الحرب العالمية الثانية .

إذا كان الأمر كذلك ، فيضم السيبرنيتيك بين جناحيه كل محصلة التكنولوجيا المعاصرة باستثناء انتاج الآليات الضخمة . نجد في السيبرنيتيك المعارف المتعلقة بتنظيم وعمل البيولوجيا الانسانية . وتنصهر في بوتقته كل الأبحاث الحديثة في العالم ، ففي هذه البوتقة تتوضع المشاكل الاجتماعية ، الفلسفية ، وكذلك الأخلاقية .

وهكذا إذا وصفنا انساناً ما بكونه عالم سيبرنيتيك ، فإن ذلك لن يعطينا فكرة محددة عن مجال تخصصه ، إلا إذا كان هذا الانسان عبقرياً شمولياً بشكل استثنائي إذ ليس بالضرورة أن يحيط عالم السيبرنيتيك بكل تفاصيل نظرية المعلومات .

ولحسن الحظ ، فالقليل من العلماء يعتبرون أنفسهم اخصائيي سيبرنيتيك ، إلا إذا استثنينا أحاديث بعضهم لمن يعتبرونهم في حالة فقر بالنسبة لقواعدهم المعلوماتية . وهكذا إذا كان السيبرنيتيك غامضاً وممتداً ، فإن ذلك لن يضر كثيراً . ويبقى مصطلح السيبرنيتيك مفيداً جداً ، وهو يضيف بهجة كبيرة للإنسان ، أو لموضوع البحث ، وحتى لكتاب . وهذا ما هدفت اليه هنا ، أن أضيف قليلاً أو ربما كثيراً من البهجة في هذا الكتاب .





## الفصل الثاني عشر

### نظرية المعلومات وعلم النفس

قرأت حول موضوع نظرية المعلومات وعلم النفس أكثر مما أذكره أو أحتاجه لاهتماماتي . وكان معظمه منصباً على ربط مصطلحات جديدة بأفكار قديمة غامضة ، إذ أن الآمال كانت متمحورة حول إمكانية توضيح تلك الأفكار بفعل سحري بمجرد طرح كلمات جديدة .

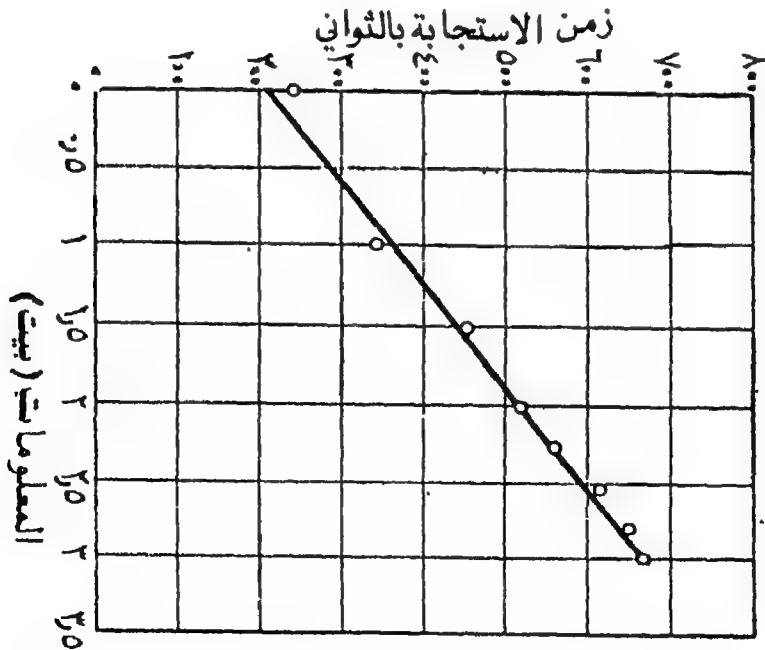
الا أن بعض تطبيقات نظرية المعلومات في حقل علم النفس التجريبي قيمة . يصعب أن نستنتج من هذه المعلومات أحكاماً نهائية ومؤكدة ، إلا أنها تشكل قاعدة ، أو ربما سبباً ، لتخمينات مشيرة سأحاول في هذا الفصل عرض بعض التجارب البسيطة والمفهومة المرتبطة بنظرية المعلومات وعلم النفس . وقد قمت بانتقائها من خلال خبرتي الشخصية واهتماماتي أشير هنا إلى ضرورة فرض بعض التحفظات لدى تناول أي موضوع واسع وغير واضح المعالم بشكل كامل .

يبدو لي أن رد الفعل الأولي لعلماء النفس تجاه نظرية المعلومات انبثقت عن كون الانتروبي معياراً شاملاً ومتميزاً لكمية المعلومات ، وعن حقيقة استخدام الكائن الإنساني للمعلومات . يعني ذلك بشكل ما أن صعوبة مهمة معينة ، متمثلة في الزمن اللازم لانجازها ، إنما تتناسب مع كمية المعلومات المتوفرة .

توضح هذه الفكرة في تجارب أجراها واري هايمان وهو عالم نفس تجريبي ونشرها في مجلة علم النفس التجريبي عام ١٩٥٣ سأقتصر هنا على عرض تجربة واحدة من عدة تجارب أجراها هايمان .

توضع عدة أضواء أمام الشخص المختبر . وقد ربط كل ضوء بكلمة وحيدة المقطع تم ابلاغ الشخص المعني عنها تبدأ التجربة بإشارة تنبيه يعقبها وميض أحد الأضواء ثم يطلب من الشخص المختبر ذكر اسم الضوء بالسرعة الممكنة . تقاس الفترة الزمنية الفاصلة بين الوميض ونطق الشخص المختبر باسم الضوء الذي أنار .

كانت التجربة تجري في بعض الأحيان على ثمانية أضواء يومض أحدها بشكل عشوائي على أساس احتمالات متساوية تكافئ هذه الحالة المعلومات المنقولة للشخص المختبر ، والتي تمكنه من تمييز الضوء بشكل كامل ، لع ٨ أو ٣ بيت . كان عدد الأضواء في بعض الحالات ٧ ( ٢٨٨ بيت ) أو ٦ ( ٢٥٨ بيت ) أو ٥ ( ٢٣٢ بيت ) أو ٤ ( ٢ بيت ) أو ٣ ( ١٥٨ بيت ) أو ٢ ( . بيت ) رسم بعد ذلك الخط البياني الممثل للزمن الفاصل بين الوميض وذكر اسم الضوء ، أي زمن الاستجابة بدلالة كمية المعلومات مقدرة بالبيت كما في الشكل ١٢ - ١ .



الشكل ( ١٢ - ١ )

يتضح أن هناك وقت استجابة معيناً حتى في حالة استخدام ضوء وحيد ، فالاختبار بين الاضواء اكيد وكمية المعلومات المنقولة في هذه الحالة تساوي الصفر . عندما يزداد عدد الاضواء ، يزداد زمن الاستجابة بشكل مطرد مع كمية المعلومات المنقولة . ان هذا الازدياد المتناسب مع لوغاريتم عدد البدائل كان قد لوحظ من قبل عالم نفس الماني هو ج . ميركيل عام ١٨٨٥ . تبدو هذه النتيجة الحقيقية مؤكدة قابلة للتكرار عن السلوك الانساني .

نلاحظ من الشكل ١،٢ - ١ ان ازدياد زمن الاستجابة هو حوالي ١٥ر. نانية لكل بيت . يذهب بعض علماء النفس غير المتحفظين الى التاكيد بأنه يلزم الانسان حوالي ١٥ر. ثانية للاستجابة لكمية من المعلومات تساوي ١ بيت . وهكذا فالسعة المعلوماتية للانسان هي  $\frac{1}{15 \text{ ر.}} = ٧$  بيت في الثانية . هل يعني ذلك أننا قد وضعنا اليد

على ثابت عام للادراك أو التفكير الانساني ؟

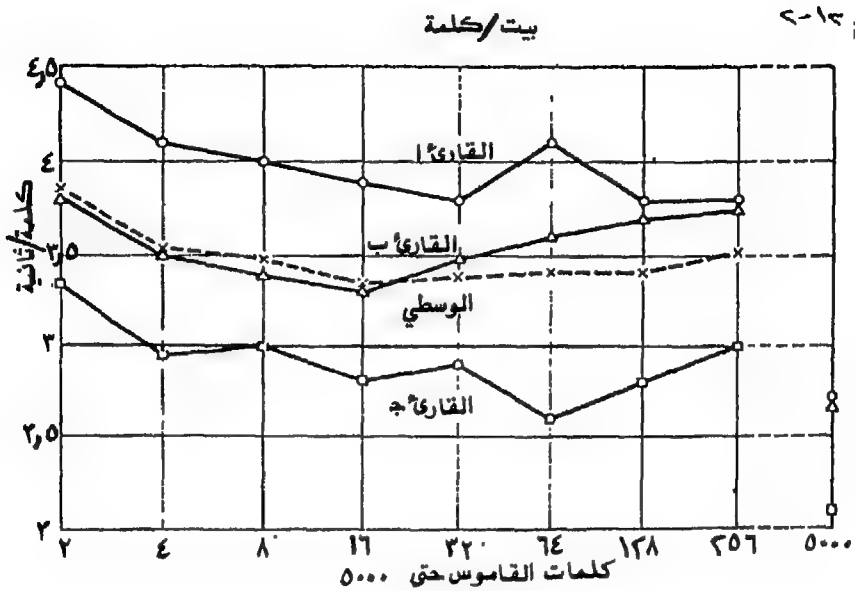
يتناسب ازدياد زمن الاستجابة في تجربة هايمان مع الريبة في المنبه مقاسة بالبيت . الا ان التجارب المختلفة التي اجراها علماء متميزون افضت الى نتائج متباينة . واكثر من ذلك . فقد أوضح كل من ج . هـ . موبراي و م . ف . رودس عام ١٩٥٩ ، أنه بعد كثير من المرات يتغير اداء الشخص بحيث يصبح زمن الاستجابة مستقلاً عن المحتوى المعلوماتي . يبدو ان الكائنات الانسانية تمتلك طرائق متعددة لتناول المعلومات ، فهناك طريقة تستخدم في التعليم حيث يلعب عدد البدائل دوراً مهماً ، وطريقة أخرى تبرز بعد قطع مراحل كبيرة من عملية التعلم حيث يختزل دور البدائل الى نطاق محدود ، بل ويبدو اثر كمية المعلومات في تجربة أخرى محدداً منذ البداية ، حيث يجب على الشخص المختبر ان يضبط مفتاحاً او اكثر من اصل عدة مفاتيح تلمسها اصابعه بمجرد احساسه باهتزاز المفتاح او المفاتيح المعينة .

واكثر من ذلك ، اذا كان زمن الاستجابة مساويا فعلا لكمية ثابتة يضاف اليها زيادة ما مناسبة للمحتوى المعلوماتي ، فانه يبقى من غير الاكيد ان نحصل على سرعة معلوماتية هامة بقسمة الوقت على عدد واحداث البيت . سنرى ان ذلك سيفضي الى سرع معلوماتية خيالية من خلال التجربة التي سأعرضها فيما يلي .

اجرى هـ كواستلار تجارب مبكرة على السرعة المعلوماتية حيث كان على الشخص المختبر ان يعرف سلاسل عشوائية من القطع الموسيقية كما اجري ج . س . بر . ليكلاندر تجارب على سرعة القراءة والتأشير . بدأت مع ج . اي . كارلين ، وقبل علمنا بهذه الانجازات ، سلسلة مس التجارب حول قراءة قوائم من الكلمات ، وهي تعطي بالمقارنة مع النوعيات الاخرى من التجارب ، اكبر سرعة معلوماتية ملحوظة ، مثلا اكبر من سرعة ارسال رموز مورس ومن سرعة الطبع بالالة الكاتبة .

نفرض ان المرسل يختار ابجدية مؤلفة مثلا من ١٦ كلمة ثم يعتمد الى اعداد قائمة باجراء خيارات عشوائية من بين هذه الكلمات وعلى اساس احتمالات متساوية . تساوي كمية الخيار في هذه الحالة ولكل كلمة  $16 = 4$  بيت . يبت الشخص المختبر المعلومات عبر ترجمتها الى شكل جديد هو شكل الخطاب بقراءته القائمة بصوت مرتفع . فاذا كان بامكانه مثلا القراءة بسرعة ٤ كلمات في الثانية يكون بامكانه بث المعلومات بسرعة  $4 \times 16 = 64$  بيت في الثانية .

يوضح الشكل ١٢ - ٢ المعلومات الخاصة بثلاثة اشخاص مختبرين . وقد تم انتقاء الكلمات الخمسمائة الاكثر استخداما في اللغة الانكليزية . يلاحظ انه بينما تنخفض سرعة القراءة نوعا ما بالتحول من القاموس اللغوي ذي الكلمتين الى القاموس ذي الاربع كلمات ( او من ١ الى ٢ بيت لكل كلمة ) ، تبقى هذه السرعة ثابتة تقريبا للقواميس التي تحتوي من ٤ الى ٢٥٦ كلمة ( او من ٢ الى ٨ بيت لكل كلمة ) .



الشكل ١٢ - ٢

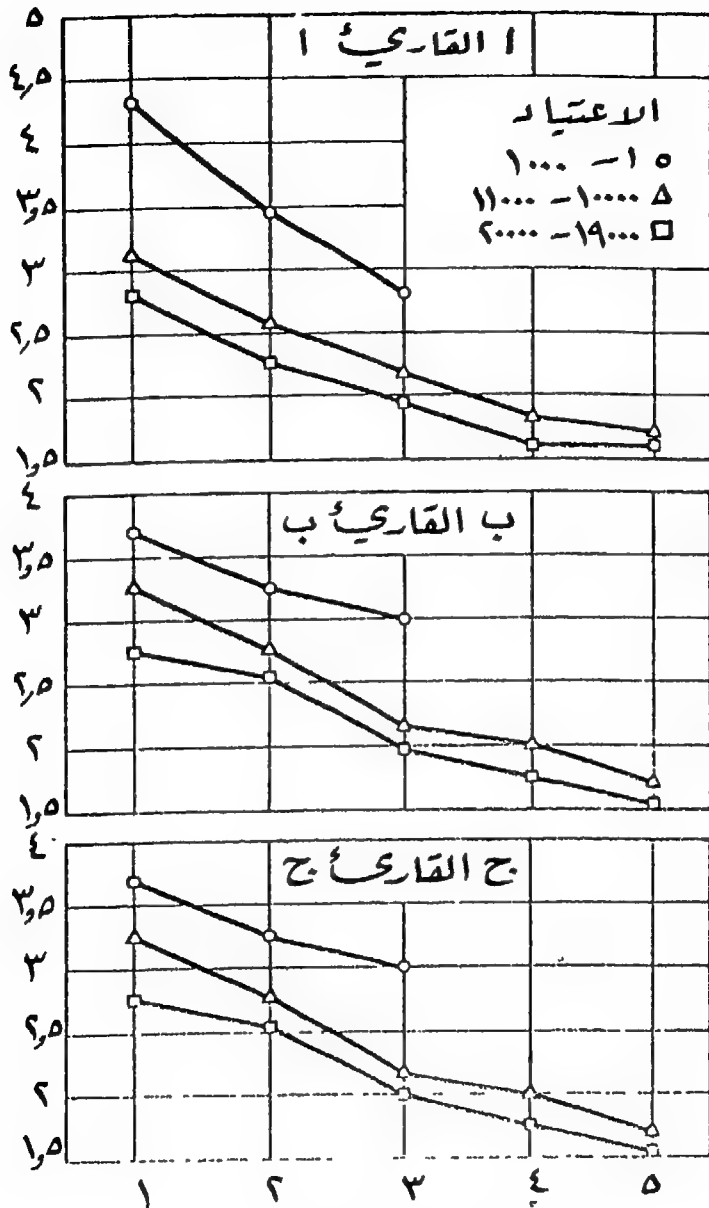
نستذكر الآن طريقة استخراج السرعة المعلوماتية من معلومات كتلك التي عالجها هايمان ، أي ملاحظة الأزدیاد في الوقت المقابل لآزدیاد كمیات المعلومات المقدرة بالبيت بالنسبة للمنبه . لندقق في الخط الوسطي المتقطع من الشكل ١٢ - ٢ . لا تتناقص سرعة القراءة إطلاقاً بالتحول من ٢ بيت للمنبه الى ٨ بيت للمنبه ، أي أن التغير في زمن القراءة لكل كلمة هو صفر ، رغم الأزدیاد في الكم المعلوماتي بمعدل ٦ بيت لكل كلمة إذا قسمنا ٦ على صفر نحصل على سرعة معلوماتية تساوي اللانهاية طبعاً هذا مضحك ، ولكنه لا يبقى كذلك في حالة استنتاج السرعة بطريقة هايمان أي بقسمة أزدیاد الكم المعلوماتي مقدراً بالبيت على زیادة زمن الاستجابة .

نستنتج مباشرة من الشكل ١٢ - ٢ ان القارئ ٢ يقرأ الكلمات المؤلفة من ٨ بيت بسرعة ٣٨ في الثانية ، وهكذا فهو يبت المعلومات بسرعة  $8 \times 38 = 304$  في الثانية . واكثر من ذلك ، عندما يتم اختيار كلمات القائمة وبشكل عشوائي من قاموس يضم ٥٠٠٠ كلمة ( ١٢٣ بيت لكل كلمة ) ، فانه عند ذلك سيقرا بسرعة ٢٧ في الثانية محققا سرعة معلوماتية اكبر هي ٣٣ بيت في الثانية .

يتضح انه لا توجد سرعة معلوماتية وحيدة يمكن ربطها باداء الكائن البشري ، اذ ان باستطاعة هذا الكائن بث المعلومات ( وكما سنرى فيما بعد الاستجابة لها او تذكرها ) في شروط معينة بشكل افضل من حالة شروط اخرى . واحسن صورة يمكننا ان نكونها عن الانسان انه قناة او جهاز ناقل للمعلومات له خصائص وقدرات محددة . الا انه جهاز في منتهى المرونة اذ بإمكانه تناول المعلومات باشكال عدة واحسن ما يكون عليه هذا التناول في حالة كون المعلومات مرمزة بشكل مناسب لتأثيراته .

ما هي هذه انقاليات ؟ نقرأ من الشكل ١٢ - ٢ ان الانسان يبطىء بكميات طفيفة لدى ازدياد التعقيد ، فهو يستطيع قراءة قائمة من الكلمات مختارة بشكل عشوائي من ابجدية فيها ٢٥٦ كلمة تقريبا بنفس السرعة في حالة ابجدية فيها ٤ كلمات فقط . انه ليس بسرعة الآلات ، ولكي نحسن من ادائه علينا مطالبة بتنفيذ مهمات معقدة . هذا هو ما كان ممكنا ان نتوقعه .

لا ان التعقيد سيبطئه في النهاية ، كما نرى في حالة الابجدية المكونة من ٥٠٠٠ كلمة . ربما ان هناك ابجدية مثلى لكل كلمة فيها عدد من وحدات البيت ، وبحيث ان عدد الكلمات لن يبطىء عملية القراءة بشكل ملحوظ . قمت انا وكارولين ، في محاولة منا لايجاد هذه الابجدية ، بقياس سرعة القراءة بدلالة عدد المقاطع ودلالة الاعتياد اي فيما اذا كانت الكلمة منتقاة من الكلمات الالف الاولى الاكثر شيوعا او من الكلمات العشرة الالف الاولى . يوضح الشكل ١٢ - ٣ هذه التجارب .



عدد المقاطع لكل كلمة

الشكل ١٢ - ٣

نلاحظ انه بينما يؤدي ازدياد عدد المقاطع الى انخفاض سرعة القراءة يؤدي نقص الاعتماد الى نفس النتيجة تقريبا . وهكذا فقد يكون القاموس المعتاد والمكون من الكلمات وحيدة المقطع هو الانسب . استطاع أحد القراء تحقيق سرعة قراءة مساوية لـ ٣٧ كلمة في كل ثانية ، أي ٤٢ بيت في كل ثانية باستخدام قاموس مؤلف من الكلمات الوحيدة والاكثر استخداماً او اعتياداً والبالغ عددها ٢٥٠٠ كلمة ( ٢٥٠٠ كلمة يعني ١١٨٣ بيت لكل كلمة ١٠ .

تملك الفقرات النثرية المكتظة ، اي تلك النصوص التي تنتقى كلماتها على اساس تكافؤ الاحتمال ودون روابط اعرابية ، سرعة معلوماتية عالية كحالة النصوص غير التقنية . وتساوي الانثروبي في حالتها ١١٨٣ بيت لكل كلمة وسرعة القراءة ٣٧ كلمة في الثانية والسرعة المعلوماتية المقابلة ٤٤ بيت في الثانية .

اعتقد اننا نستطيع احراز كسب ما بتحسين الابدعية ، إلا ان هذا الكسب سيكون غير ذي أهمية . وعلى كل حال ، اعطت هذه التجارب اعلى سرع معلوماتية امكن الحصول عليها ، وهي سرع صغيرة وفق معايير الاتصالات الكهربائية ، الا انها مع ذلك تمثل عدداً كبيراً من الخيارات النائية ، حوالي ٢٥٠٠ في الدقيقة .

ما هو الشيء الذي يحد من هذه السرعة ؟ هل هو قراءة الكلمات حرفاً بحر ف ، اذا كان الامر كذلك ، تعتبر اللغة الصينية احسن لغات العالم لان فيها شارة معينة لكل كلمة ، الا ان الصينيين الذي يقرؤون قوائم عشوائية . من الاحرف الصينية ومقابلاتها من الكلمات الانكليزية يفعلون ذلك بنفس السرعة .

هل يمكن أن تكون القيود على السرعة ميكانيكية الطابع يوضح الشكل ١٢ - ٤ السرعة لمهام مختلفة اذ يبين كيف يستطيع احد الاشخاص استظهار مقطع بضعف سرعته في قراءة مقطع عشوائي التركيب منتقاة



## كلمة في الثانية



- ۳۰۳ -

يعتمد تنمية القابليات الانسانية في مجال معين على التجارب المدروسة .  
المخططة بشكل جيد . تشبه هذه العملية ترميز الرسائل من مصدر  
رسائل معين بهدف تحقيق اكبر سرعة بث للمعلومات عبر قناة ذات  
ضجيج ، وقد سبق ان بحثنا ذلك في الفصل الثامن ، واسمينا السرعة  
العظمى عندئذ بسعة القناة . لقد تم انشاء القائمة المنتجة من الكلمات  
والتي تضمنت الكلمات الـ ٢٥٠٠ الاولى الاكثر شيوعاً والمؤلفة من مقطع  
واحد ، عبر محاولة هادفة لتحقيق سرعة معلوماتية عالية لقراءة مجموعات  
عشوائية من الكلمات بصوت مرتفع .

يجدر بنا ان نلاحظ ان انتقاء كلمات النصوص بشكل عشوائي مع  
الاخذ بعين الاعتبار لاحتمالات ورودها الطبيعية يقضي الى سرعة  
معلوماتية اكبر بقليل . هل من الممكن ان تكون كلمات لغة معينة وتواتر  
ورودها قد وفقا على نحو ما مع القابليات الانسانية عبر عملية طويلة  
من الاختيار اللاواعي المتطور .

رأينا في الفصل الخامس ان احتمال ورود كلمة في النصوص الانكليزية  
يتناسب مع تواترها ، اي ان الكلمة ذات الترتيب مئة في تواتر ورودها  
اقل باحتمال ورودها بمئة مرة بالمقارنة مع الكلمة الاكثر شيوعاً . سبق  
ان اوضح الشكل ٥ - ٢ هذه العلاقة التي اشار اليها للمرة الاولى جورج  
كينغسلي زيف وعزاها الى مبدأ الجهد الاقل .

ان قانون زيف لا يمكن ان يكون صحيحاً بشكله البسيط هذا فقد  
عرفنا في الفصل الخامس الى ان حساب احتمال ورود الكلمات ما تقدم  
لا يمكن ان يكون مطلق الصحة ، اذ لو تحقق ذلك لكان مجموع الاحتمالات  
اكبر من الواحد . لقد جرت محاولة لتعديل واشتقاق وشرح قانون زيف  
بشكله الاصلي والابسط على انه توصيفه تقريبي للسلوك الانساني ازاء  
'اللفة' ، وقد توصل زيف الى هذا القانون بشكل تجريبي عبر اختبار  
احصائيات النصوص الفعلية .

كما قدمنا ، ربط زيف قانونه بمبدأ الجهد الاقل . لقد تركزت الجهود لربط الطاقة الموظفة أو الثمن اللازم لانتاج النصوص مع عدد الاحرف في النصوص . يعتبر اللغويون ان اللغة هي اولا اللغة المنطوقة ، ويبدو من غير المحتمل ان تكون عادات القراءة والكتابة والنطق قد نشأت على هامش عدد الاحرف اللازمة لتكوين الكلمات .

لاحظنا فعلا ان تجارب السرعة المعلوماتية التي اعتبرناها للتو تفضي الى حقيقة مفادها ان سرعة القراءة هي نفسها للمقاطع الصينية والكلمات الانكليزية المقابلة المبينة من الاحرف الهجائية وراينا من خلال الشكل ١٢ - ٣ كيف يؤثر كون الكلمة اعتيادية او دارجة على سرعة القراءة مثلما يؤثر عدد المقاطع .

الا يمكننا اعتبار وقت القراءة كمعيار للجهد ؟ قد يجنح تفكيرنا مثلا الى الاعتقاد باننا نستطيع التعامل مع الكلمات الاكثر شيوعا بسهولة اكبر اي اننا نتذكرها ونستخدمها بجهد او ثمن ادنى بالمقارنة مع الكلمات الاقل شيوعا . ربما ان تنظيم الدماغ الانساني يقوم على نوعين من التخزين : الاول يهدف الى الاسترجاع السهل للكلمات ، بينما تستعاد الكلمات في النوع الثاني بصرف جهود كبيرة ويتميز الاول بتغطيته عددا قليلا من الكلمات وحسب . نميل عند هذه المرحلة الى فكرة ان وقت القراءة هو مقياس لسهولة التناول ، او الثمن المطلوب .

لنتخيل اكثر من ذلك ، بان الكائنات الانسانية تستخدم اللغة بطريقة تسمح ببيت المعلومات باكبر كمية ممكنة مقابل ثمن معين ، فاذا اعتبرنا ان هذا الثمن هو زمن النطق ، نستنتج ان الانسان يسعى لنطق اكبر كمية ممكنة من الكلمات خلال زمن محدد .

يؤدي استخدام مبادئ رياضية بسيطة الى برهان علاقة ترتبط باعلى سرعة معلوماتية ممكنة ، اذ لتحقيق مثل هذه السرعة في حالة رسالة مكونة من كلمات مختارة بشكل عشوائي ، يجب ان يتم هذا الاختيار وفق احتمال قدره  $H$  (  $H$  معطى بالعلاقة :

$$ح(ر) = \frac{1}{2} \theta^2$$

حيث  $\theta$  هو زمن قراءة الكلمة ذات الترتيب  $r$  في قائمة الكلمات الأكثر شيوعا ، و  $\theta$  هو ثابت نختاره بشكل يصبح مجموعة الاحتمالات كلها مساويا الواحد . تقول هذه العلاقة ان الكلمات المرتبطة بوقت قراءة طويل ستستخدم بتواتر اقل من تلك ذات وقت القراءة القصير ، وهذه العلاقة صحيحة بقدر رغبتنا في الحصول على سرعة معلوماتية اعظمية .

اذا كان قانون زيف صحيحا ، يجب ان يساوي الاحتمال  $(r)$  حيث

$$ح(r) = \frac{1}{r}$$

$\theta$  هو ثابت آخر . ينتج من هاتين المساواتين ان :

$$\frac{1}{2} \theta^2 = \frac{1}{r}$$

وبالعودة الى بعض الشروح في الملحق ، نصل من هذه العلاقة الى علاقة اخرى هي :

$$\theta = \sqrt{2r}$$

هنا ب ، ح ثابتان يحددان باختيار العلاقة بين زمن القراءة  $r$  والترتيب وفق الاعتقاد ، اذ ان العلاقة الاخيرة يجب ان تكون صحيحة للقراءات التجريبية فيما اذا كان قانون زيف صحيحا وكانت السرعة المعلوماتية تصل حتى نهاية عظمى في حالة الانتقاء العشوائي والمستقل للكلمات وفق الاحتمال الوارد في قانون زيف .

لا تنتقى الكلمات بشكل عشوائي ومستقل عند انشاء النصوص اللغوية الفعلية ، لذا لا نستطيع التاكيد بان الكلمات المنتقاة وفق قانون زيف

ستصل بالسرعة المعلوماتية الى قيمة عظمى . الا انه من المفيد والمتع أن نحاول معرفة مدى صحة التنبؤات القائمة على اساس الاختيار العشوائي والمستقل للكلمات ، خاصة في حالة قراءة النصوص اللغوية .

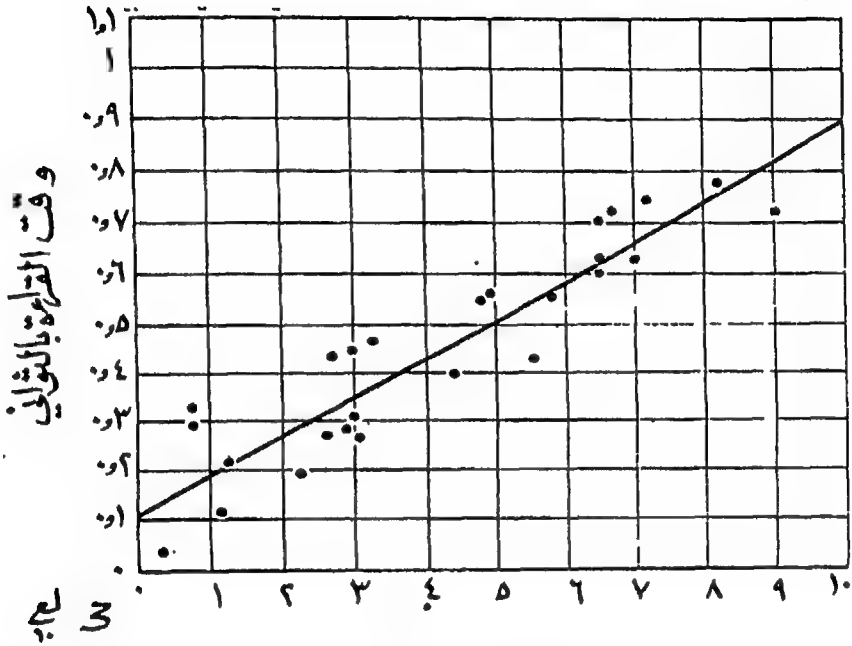
عالج الرياضي بنويت ماند لبروت هذا الموضوع من خلال المعلومات الخاصة بوقت القراءة التي جمعها عالم النفس التجريبي د. هـ. هوز ، وقد عرف ماند لبروت باهتمامه في اللغويات . وقد حاولت بنفسي مقارنة العلاقة الاخيرة مع السلوك الانساني الفعلي بمساعدة اللجرب الخبير في مجال علم النفس الفيزيائي ر. ر. ويزس .

هناك صعوبة حقيقية في اجراء مثل هذه المقارنة . يبدو واضحا ان سرعة القراءة تقيد بإمكانية تمييز الكلمة وليس بنطقها ، اذ يمكن لانسان ما ان ينطق كلمة طويلة معروفة ، بينما يحدق في كلمة أخرى قصيرة وغير معروفة محاولا تمييزها . يمكن الالتفاف حول هذه الصعوبة باجراء عملية توسيط وذلك عبر قياس الزمن الكلي اللازم لنطق ثلاثة كلمات متتالية ومن ثم مقارنة هذا الزمن بالزمن المحسوب من العلاقة الاخيرة .

انجز ريزس هذا العمل ولخص نتائجه في الشكل ١٢ - ٥ . ينطوي الاختبار على محاولة الشخص القراءة باسرع ما يمكن . تمثل العلاقة الاخيرة خطا مستقيما ، اما النقاط التجريبية في الشكل ١٢ - ٥ فهي اكثر انتشارا من ان يجمعها خط مستقيم .

كان علينا ان نتوقع مثل هذا الانتشار اذ اننا قمنا بعملية تجيير التواتر الطبيعي للكلمات في النصوص الفعلية الى خبرة الشخص الموضوع تحت الاختبار ، كما راينا من الشكل ١٢ - ٣ إمكانية تأثير طول الكلمة على سرعة القراءة ، وأخيرا فقد أهملنا تماما العلاقة بين الكلمات المتتالية .

يشير هذا النوع من التجارب الغضب فعلا ، اذ يمكن ان نستقرئ ما يمكن اجراؤه هذه التجارب ، الا ان كلاً منها يحتاج لوقت طويل ، كما



الشكل ١٢ - ٥

أننا لا ندري فيما إذا كانت ستتمخض عن نتائج ذات قيمة حدية . ربما أن عبقريا ما سيكشف عن الحقيقة في أحد الأيام ، إلا أن عالم النفس المتحفظ يجنح لجعل عمله وأعدا بنتائج أكيدة لا جدل حولها .

يوحي العمل السابق ، على الأقل ، بأن الاقتصاد في الجهد يحكم استخدام الكلمة ، وأن الاقتصاد في الجهد يعني الاقتصاد في الوقت . اننا مازلنا في حيرة فيما إذا كان هذا ناتج القابليات المدربة للتلاؤم مع اللغة أو فيما إذا كانت اللغة نفسها تصبح أكثر تناغما مع القابليات الفكرية لبني البشر . ما عساه يكون أمر عدد الكلمات التي نستخدمها ، مثلا ؟

يقيس بعض الباحثين أحياناً المعجم اللغوي للكاتب بمجموع الكلمات المختلفة في أعماله ، والمعجم اللغوي بشكل أعم لأي إنسان بمجموع الكلمات المختلفة التي يفهمها . إلا أن الكلمات النادرة وغير العادية تشكل في حقيقة الأمر نسبة ضئيلة من مفردات اللغة . يبرز عند هذه المرحلة السؤال التالي : وما هو عدد الكلمات التي تشكل معظم اللغة ؟

قد يذهب البعض للتأكد بأن عدد الكلمات المستخدمة يعكس تعقيد الحياة ، فما نحتاجه من المفردات في مدينة كبيرة لا يفيدنا في قرية صغيرة ولكننا على كل حال نملك حرية الخيار بين استخدام كلمة جديدة للدلالة على شيء ما أو جملة من كلمات شائعة للدلالة على نفس الشيء ، كان نقول مثلاً التلفزيون أو الجهاز الذي يرينا ما تبثه أجهزة أخرى بعيدة ، هنا كلمة التلفزيون الأولى تشير إلى شيء معين ولها استخدام متخصص بينما الكلمات في المجلة الأخرى : الجهاز ، الذي ، يرينا ، ما ، تبثه ، أجهزة ، أخرى ، بعيدة ، فلها استخدامات أخرى أيضاً .

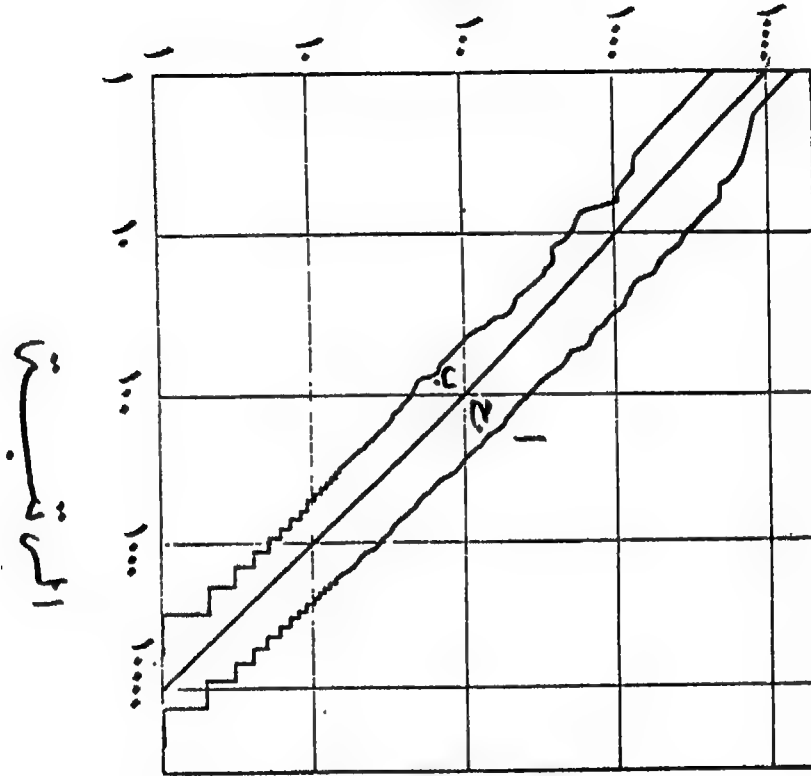
وهكذا نستطيع إنشاء لغة اصطناعية بعدد أكبر أو أقل من الكلمات بالمقارنة مع اللغة الأصلية ونستطيع بواسطتها قول نفس ما نقوله باللغة الأصلية . يمكننا أن نذهب أبعد من ذلك إذا شئنا فنعتبر أبجدية اللغة كلغة مختزلة بحد ذاتها يمكننا أن نترجم إليها أي نص لغوي . .

ربما تجنح كل اللغات لامتلاك معجم أساسي يفرضه قابليات تنظيم الدماغ البشري بأكثر مما يفرضه التعقيد الظاهري للمحيط . يضيف عادة المتميزون والمبدعون من بني البشر إلى هذه اللغة الأساسية عدداً من الكلمات الخاصة وغير المتواترة بقدر ما يرغبون أو يتذكرون .

درس زيبف هذه القضية من خلال المخططات الموضحة لقانونه . يوضح الشكل ١٢ - ٦ علاقة تواتر الكلمة بدلالة درجة شيوعها أي كما أشرنا سابقاً كم هي اعتيادية هذه الكلمة ورتبة امتيادها . يعطي الشكل ثلاثة حالات : الأولى فقرة من عمل أوليس لجيمس جويس ولعدد من

الكلمات مساوٍ لـ ٢٦.٤٣٠ كلمة ، والثانية لـ ٤٣٩٨٩ كلمة مأخوذة من الصحف، حيث أشير للخالة الأولى بالحرف آ وللحالة الثانية بالحرف ب . أما الحالة الثالثة وهي الخط المستقيم ح فيمثل قانون زيفف النظري .

## التواتر



الشكل ١٢ - ٦

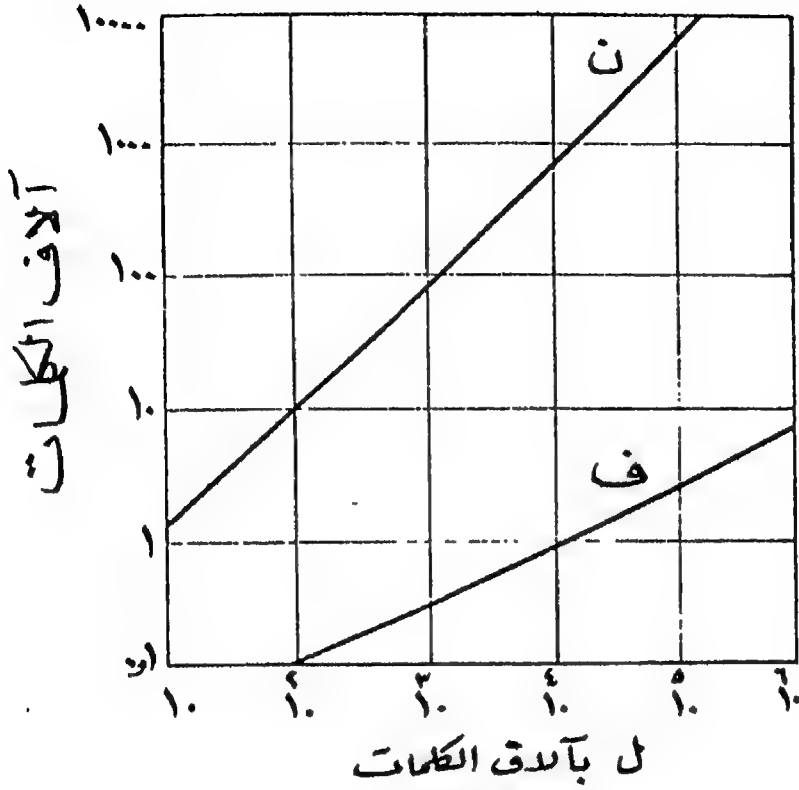
يتحدد ارتفاعا آ و ب بعدد الكلمات في العينة ، في حين أن ميل المنحنيين ، وهو الشق الثاني المهم ، فيرتبط بطول العينة . أما القسم المتدرج في الزاوية اليمنى السفلى من المنحنيين فيعكس حقيقة ورود بعض الكلمات غير المألوفة مرة ربما أو مرتين أو أكثر ، ولكن ليس ٥٠ مرة أو ٢٦٧ مرة .



عندما نحاول توفيق كل من المنحنيين الى المستقيم ح المائل بزاوية ٥٤٥ ، نجد ان العوامل الهامة في الموضوع تتعدى موضوع الميل . نبدأ قياس التواترات بالكلمات التي ترد مرة واحدة ، هنا تمثل الزاوية اليمنى السفلى تواتر ورود مساوياً الواحد . كذلك يبدأ محور الرتب بالعدد ١ المقابل لأكثر الكلمات استعمالاً . وهكذا يبدأ كل من المحورين بالعدد ١ ثم يظهر كل منهما نفس التقسيمات أيضاً لتمثيل نفس الازديادات في الأعداد . يتضح من الشكل ان الخط الممثل لقانون زيبف يعكس حقيقة مفادها ان عدد الكلمات المختلفة في العينة يجب ان يساوي عدد مرات ورود أكثر الكلمات استخداماً .

نذهب أبعد من ذلك فنقول : اذا كان قانون زيبف صحيحاً في صيغته الأولية هذه فان نصف عدد الكلمات في العينة ستكون مساوية للجذر التربيعي لعدد الكلمات المختلفة في الفقرة المعبرة . يعطي الشكل ١٢ - ٧ العلاقة بين عدد الكلمات المختلفة و عدد الكلمات ل في الفقرة المعبرة ، وكذلك العلاقة بين ف عدد الكلمات المكونة لنصف الفقرة وعدد الكلمات فيها ل .

تنعكس هنا محدودية مفرطة في معجم المفردات ، اذ تشكل ١٧ كلمة نصف فقرة جويس ، كما يؤكد الشكل ١٢ - ٦ نفس الحقيقة بالنسبة للكتابات الصحفية . يؤكد زيبف ان قانونه يصلح للغة الجرمانية القديمة اذا شمل تعدادها كل ما يحتل موضع كلمة من النص ، وكذلك مختلف اللهجات الجرمانية ، وان ظهرت بعض الشذوذات في القسم اليساري الأعلى من الخط الممثل للقانون . تجنح المنحنيات الممثلة للغة النرويجية لان تكون أكثر حدة في القسم الأيمن الأسفل بالمقارنة مع القسم الأيسر الأعلى ، كما تعطي لغات أخرى خطأ يساوي ميله ثلاثة أرباع خط زيبف . يعني ذلك عدداً أكبر من الكلمات المختلفة في نص معين ، أي معجماً أكبر . أما في حالة اللغة الصينية ، فيرتفع المنحني فجأة في أعلى اليسار دالاً على مفردات أكثر .



الشكل ١٢ - ٧

ومهما يكن من امر ، تعكس هذه الدراسة التشابه بين مختلف اللغات ، اذ يتشابه توزيع واحتمال الكلمات أن لم يكن في كل اللغات ففي معظمها ، فلربما توائم اللغات نفسها مع فإليات العقل الانساني وتنظيمه ومبناه ، ولربما أن كل انسان يلاحظ ويعبر عن نفس عدد التظاهرات في محيطه ، فانسان الاسكيڤو يستخدم مفردات مختلفة للتعبير عن انواع متباينة من الثلج . على كل حال تشترك كل اللغات في سمة واحدة هي محاولة تصغير الجهد المبذول لتحقيق الاتصالات الانسانية . نؤكد هنا أن هذه النتيجة ليست نهائية بحال من الأحوال .

وجهت انتقادات حادة لعمل زيبف . فأننا مثلاً اعتقد أن من المستحيل أن يلعب طول الفقرة ، وبصرف قانون النظر عن المؤلف ، العامل الرئيسي في تحديد عدد الكلمات المختلفة . طبعاً يثبت قانون زيبف حقيقة هامة وهي أن تواتر ورود الكلمات لا يتغير بطول العينة . يذهب بعضهم إلى التصور بأن صحة قانون زيبف ، أكثر ما تظهر لعينات طولها بحدود ١٢٠٠٠ كلمة ، وأنه في عينات أصغر تتواتر كلمات لا تزد إلا مرة واحدة ، بينما في العينات الأكبر يتضاعل عدد الكلمات وحيدة الورد . وهكذا يبدو من المعقول أن سبب تشابه معجمي جويس والصحف اليومية هو أن الصحف مؤلفة من قبل عدد كبير من الكتاب .

اقتصر تناولنا لقانون زيبف حتى الآن على اعتباره ملائماً للمعلومات التجريبية بشكل تقريبي ومن ثم على التساؤل عما نستطيع فعله بعد ذلك . إلا أن هناك منظوراً آخر لهذا القانون ، إذ يمكن أن نبرهنه على ما هو عليه انطلاقاً من فرضيات بسيطة تتعلق بتوليد النصوص . لقد أعطى عدد من الباحثين مثل هذا البرهان وكان أهم ما قدم في هذا المجال هو عمل الرياضي ماندلبروت الذي أثينا على ذكره ، ويبدو أنه ذهب إلى أبعد من حدود هذا البرهان أيضاً .

يعطي ماندلبروت اشتقاقين مختلفين . يفرض في الأول أن النص ينتج من سلسلة من الأحرف والفراغات المنتقاة بشكل عشوائي وباحتمالات غير متساوية ، كما في التقريب الأول للنصوص اللغوية في الفصل الثالث . يسمح ذلك بعدد لا نهاية له من الكلمات المختلفة المؤلفة من سلاسل من الأحرف مفصولة عن بعضها بسلاسل من الفراغات .

يبين ماندلبروت ، استناداً لهذا الفرض فقط ، أن احتمال ورود هذه الكلمات ح ( ر ) يمكن حسابه من العلاقة :

$$ح ( ر ) = ن \times ( ر + ف ) - ب$$

حيث ر هو ترتيب الكلمة المعنية وفق تصنيف الكلمات «الدرجة» ، المعتادة أو الأكثر استخداماً . أما ب ، ف فهما ثابتان يمكن حسابهما إذا عرف احتمال كل كلمة وكل فراغ في النص . وأخيراً تحدد قيمة ث على أساس جعل مجموع كل الاحتمالات مساوياً للواحد الصحيح .

نلاحظ هنا أنه إذا كان ف صغيراً و ب تقريباً واحد فإن العلاقة الأخيرة تقترب من قانون زيبف . وبالمقارنة مع الخط المستقيم لقانون زيبف فإن هذه العلاقة تعطي منحنيًا أكثر حدة في أعلى اليسار وأقل انحداراً في أسفل اليمين . بقي أن نقول إن هذا المنحني يلائم معلومات النصوص الفعلية أكثر مما يلائمها قانون زيبف .

لقد تم التأكيد على كل حال بأن طول الكلمات المنتجة بالعملية العشوائية الموصوفة لا تقابل طول الكلمات في النصوص اللغوية الفعلية .

ولا بد من الإشارة أيضاً إلى أن اللغات لها مظاهر غير عشوائية ، إذ تقصر الكلمات كلما تواتر استخدامها . هل لنا الحق إذن بأن نتبنى صحة قانون زيبف لمجرد أن الانشاء العشوائي للكلمات يقود إلى كلمات تحقق هذا القانون . واقع الأمر أننا سنمتلك هذا الحق إذا توفر لنا ما يؤكد بأن انتاج النصوص الفعلية يخضع لعشوائية مشابهة .

يفترض ماندلبروت في اشتقاقه الثاني لقانون زيبف أن تواتر الكلمات يجب أن يصل بالسرعة المعلوماتية إلى قيمة عظمى من أجل ثمن معين . يعتبر كحالة بسيطة وخاصة أن لكل حرف ثمناً معيناً وأن ثمن الكلمة ، أي ثمن سلسلة من الأحرف تنتهي بفراغ ، يساوي مجموع ثمن الأحراف المكونة لها . تقود هذه الافتراضات ماندلبروت إلى صيغة مماثلة لاشتقاقه الأول وأن كان معنى الثوابت الواردة مختلفاً هذه المرة . فمثلاً يمكن أن يكون الثابت ب أقل من الواحد إذا كان مجموع عدد الكلمات المسموح بها نهائياً .

يمكننا استخدام العلاقة الأخيرة وتوفيقها بانسب شكل مع المعلومات التجريبية وذلك بأن نتوقف عن البحث عن معانٍ ملائمة للتوابت الواردة فيها ، وإن نعطي تلك التوابت قيمة تحقق هذا التوفيق التجريبي ، وهذا سيكون أجود على الصعيد الفعلي من محاولة الاقتراب من قانون زيبف المقابل للقيم :  $b = 1$  ،  $f = 0$  . يبقى على كل حال حتى هذا التطبيق موائماً لأكبر عدد ممكن من الحالات باستثناء عدد قليل منها . وفي بعض الاشتقاقات اللغوية المعاصرة تكون قيمة  $b$  الأقل من الواحد هي الأنسب .

يقول ماندلبروت أن غنى المعجم اللغوي تعكسه قيمة  $b$  ، فإذا كانت هذه القيمة أكبر من الواحد فإن عدد الكلمات المكررة ينخفض ، وإذا كانت قريبة من الواحد فإن تنوعاً كبيراً من الكلمات يظهر في مجال الاستخدام . ويضيف ماندلبروت أنه ينمو الطفل تتناقص قيمة  $b$  من ١٦٠٥ حتى ١١٠٥ أو ربما حتى ١ وإذا كان الطفل هو جيمس جويس نفسه .

تؤكد ملائمة العلاقة الأخيرة للمعلومات التجريبية أكثر من قانون زيبف ، وهي تتجاوز الاعتراض المنبثق عن قانون زيبف بأن احتمال التعريف إنما يعتمد على طول العينة المجتزأة من نص . لا يعني ذلك بالطبع صحة اشتقاق ماندلبروت للعلاقة الأخيرة بشكل مطلق ، إذ من المحتمل أن تكون هناك علاقة رياضية أخرى أكثر تماشياً مع المعلومات التجريبية . ويحتاج الأمر إلى دراسة أعمق للحصول على أجوبة نهائية .

ينطبق قانون زيبف على جمل معلوماتية غير تلك المتعلقة باستخدام الكلمات ، مثلاً في حالة عدد سكان مدينة معينة بالمقارنة مع حجم هذه المدينة . وهكذا نجد في المدينة العاشرة في الترتيب من حيث المساحة عشر عدد السكان الموجودين في أكبر مدينة ، وهكذا .

إلا أن هذا الانطباق قد لا يعدو كونه تصادفياً . يخضع مثلاً الجذب الثقالي بين جسمين لقانون عكس المربع ، وكذلك شدة أضواء الشمس على

بمدين مختلفين منها ، الا انه لا يوجد قانون عام يمكن ان يفضي الى هاتين الحالتين الخاصيتين في شروط معينة .

ان قابليتنا لاستقبال ومعالجة المعلومات محدودة اصلا بالامكانات المتواضعة لجملنا العصبية . ويمثل هذه الحقيقة وقانون ٧ زائد او ناقص ٢ لجورج . . ٢ . ميلز . يذهب هذا القانون الى انه بإمكان كل انسان بعد فترة قصيرة من الملاحظة ان يتذكر ويعيد اسماء عدد من الاشياء المعتادة يساوي من ٥ الى ٩ من هذه الاشياء ، كالارقام العشرية او الثنائية ، الاحرف ، او الكلمات الدارجة .

نعرض صورة ضوئية امام شخص لفترة قصيرة ، ثم نريه عدداً من حبات الفاصولياء السوداء ، فيكون بمقدوره اعلامنا عدد العدد الصحيح حتى ٩ حبات . وهكذا فبإمكان ومضة واحدة نقل عدد من الامكانات مساو لعشرة ، مثلاً من . وحتى ٩ ، والمعلومات المنقولة في هذه الحالة لع ١٠ = ٣٣ بيت .

اما اذا عرض امام نفس الشخص عدد من الأرقام الثنائية فسوف يتذكر منها بشكل صحيح ما مجموعه ٧ ارقام ، اي انه تم نقل كم معلوماتي مساو لـ ٧ بيت .

واذا كانت المادة المعروضة أمامه هي الاحرف الابجدية ، فسيستعيد منها اربعة او خمسة ، ان اي الكم المعلوماتي في هذه الحالة سيساوي  $٥ \times \text{لع } ٢٦ = ٢٣ \text{ بيت} .$

يمكن لنفس الشخص ان يتذكر ثلاثة او اربعة كلمات قصيرة دارجة اي اقل بقليل من ٧ - ٢ = ٥ اذا اختيرت هذه الكلمات من اصل الـ ٥٠٠ كلمة الاكثر شيوعاً ، فتكون كمية المعلومات :  $٣ \times \text{لع } ٥٠٠ = ٢٧ \text{ بيت} .$

وكما في حالة التجارب على سرعة القراءة فان الربح المترتب على التعقيد الاكبر يتجاوز الضياع الناجم عن الفقرات الاقل ، حيث تزداد المعلومات بازدياد التعقيد .

وهكذا تفضي تجارب سرعة القراءة وقانون ميلر الى نتائج مربكة . اذا كان الانسان يتلقى ٢٧ بيت من المعلومات من صورة معينة ، فهل نستطيع بالمقابل بث صورة باستخدام ٢٧ بيت من المعلومات بحيث ان اسقاط تلك الصورة على الشاشة سيظهرها كصورة فعلية معتادة واذا كان بمقدور الانسان بث ٤٠ بيت من المعلومات في الثانية كما تؤكد ذلك تجارب سرعة القراءة فهل نتمكن من ارسال صورة تلفزيونية أو صوت بجودة عالية وباستخدام ٤٠ بيت من المعلومات في الثانية .

اعتقد ان الاجابة في كلا الحالتين هي النفي . ما هو الخطا اذن ؟ يكمن الخطأ في اننا قسنا ما يخرج عن الانسان لا ما يدخل اليه . ربما ان بإمكان الانسان ملاحظة ٤٠ بيت من المعلومات الهامة في الثانية الا ان لديه الخيار الكامل فيما سيلاحظه . فمثلا يمكن ان يتابع فتاة معينة أو يكتفي بالنظر الى ملابسها ، وربما يلاحظ ما هو اكثر من ذلك الا ان هذه الملاحظة سرعان ما تتبدد قبل ان يصيغها في توصيف معين .

درس عالما النفس اي . آفرباك و ج . سبرلنغ هذه المشكلة بشكل مشابه ، فقد اسقط كل منهما عدداً كبيراً من الاحرف على شاشة ( ١٦ أو ١٨ حرف ) ، وبعد اقل من ثانية نبها الشخص المختبر باشارة معينة عن الحرف الذي يجب ان يذكره . اذا استطاع ذلك فلا شك ان كل الاحرف قد انطبعت في داخله لان الحرف المعني قد انتقي بشكل عشوائي .

تؤكد نتائج هذه التجارب ان ما تخزنه العضوية من المعلومات في جزء من الثانية يتجاوز ٧ + ٢ أو ٧ - ٢ كما ورد في قانون ميلر ، ويبدو ان ٧ + ٢ أو ٧ - ٢ من هذه المعلومات تتحرك الى مخزن دائم من

الذاكرة بسرعة بند معلوماتي واحد في كل جزء من مائة جزء من الثانية ،  
او ما يساوي اقل من عشر الثانية لكل البنود . تستطيع الذاكرة الاخرة  
هذه تخزين المعلومات لعدد من الثواني . يبدو ان حجم هذه الذاكرة  
هو المسؤول عن قانون الـ  $7 + 2$  او  $7 - 2$  لميلر .

ان بإمكاننا البحث عن علاقات جديدة بين نظرية المعلومات وعلم  
النفس بشكل مستمر . وقد اخترت من هذا المحيط الواسع بعض  
النقاط القليلة وحسب . وسيبقى السؤال قائماً : هل حقاً ان نظرية  
المعلومات هامة بهذا القدر بالنسبة لعلم النفس ، او ان هذه النظرية  
تقتصر على تنظيم الممكن ، من حيث المبدأ ، باستخدام واسطة اخرى  
غير نظرية المعلومات . اعتقد شخصياً ان نظرية المعلومات قد زودت علماء  
النفس بمنظور جديد عن عملية الاتصالات وعن مدى تعقيدها وأهميتها  
كما ان هذه النظرية قد حركت علماء النفس ودفعتهم لاعادة تقييم المعلومات  
القديمة والبحث عن معلومات جديدة . ويبدو لي اضافة لذلك انه بينما  
تلعب نظرية الاتصالات الدور الرئيسي في الاتصالات الكهربائية ، تقتصر  
مجال علم النفس على دور جذاب وحسب . وأخيراً تضيف هذه النظرية  
عبارات جديدة ومبهرة في مجالات متعددة .





## الفصل الثالث عشر

### نظرية المعلومات والفن

عندما زار موسيقي معاصرو استاذ الموسيقى منذ عدة سنوات مختبرات بيل ، دهش لسماعه ان كل الاصوات الموسيقية وكل التراكيب الموسيقية يمكن اختزانها الى سلاسل عديدة . اما بالنسبة لعلماء الاتصالات فلم يكن هذا الا من سقط المتاع ، اذ ان استخدام تعديل ترميز النبضات يمكن من تمثيل أي موجة كهربائية او صوتية بسلسلة من عينات من السعة .

يبدو ان علماء الاتصالات قد تنبهوا الى بعض النقاط التي لم تكن لتهم الموسيقي . يلزم للتمثيل الجيد للموسيقى ذات عرض الحزام ١٥,٠٠٠ هـ.فث. استخدام ٣,٠٠,٠٠٠ عينة في كل ثانية لا تقل دقة كل منها عن ١٠٠ ر. ، وهذا ممكن اذا وظفنا ثلاثة ارقام عشرية او عشرة ارقام ثنائية لتوصيف سعة كل عينة .

يستطيع المؤلف ممارسة حرية الاختيار بين الاصوات بشكل مطلق اذا هو اعتبر ٢١٠,٠٠٠ عدد عشري مكون كل منها من ثلاثة ارقام في كل ثانية . سيسمح له ذلك بالانتقاء بين المؤلفات البالغ طولها حوالي عشرين دقيقة والتي يمكن كتابتها على شكل واحد متنوع بعدد من الاصفار مساو لـ ١.٨ مليون صفر ، وهو عدد كبير للغاية . بكلمة أوضح يستطيع المؤلف ممارسة اختيار مكافئ لـ ٣٠٠,٠٠٠ بيت في الثانية .

نتحسس هنا بعض الخطأ . فقد سبق وعرضنا الى أن الكائن الانساني لا يستطيع تجاوز سرعة معلوماتية قدرها . { بيت في الثانية مهما اتبع من اساليب كمحاولته القراءة بصوت مرتفع . هذه السرعة اقل بكثير من السرعة التي منحناها للمؤلف الموسيقى .

وأكثر من ذلك ، فليس بمقدور الانسان أن يتلقى ويقيم من المعلومات ما يتجاوز . { بيت في اثناية ، فعندما نصفي لمثل معين نسمع غامضاً من الكلام بسرعة متوسطة .

اشرنا الى الحرية والمرونة التي يمتلكها المؤلف في التعبير عن مؤلفه كسلسلة من العينات ، ونضيف أن مثل هذه الحرية تهدر على نطاق واسع ، إذ أن مثل هذه الحرية والمرونة نمكنا المؤلف من انتاج مجموعة من المؤلفات ستبدو للمستمع غير مهمة وغير محبة . أن الضجيج الفاوسي الابيض المحتوي كل التواترات على قدم المساواة هو من وجهة نظر رياضية محصلة التنوع وعدم التوقع . أن أكثر الاصوات أصالة هي أقلها توقعا . إلا أن الضجيج الفاوسي الابيض بكل اشكاله له نفس الواقع على الكائن الانساني ، إذ تختفي خصائصه من احاسيس الانسان الذي يحكم أن ما يسمعه ذي وتيرة واحدة وباهت .

إذا كان حكم الانسان على ما هو شديدة التنوع وقليل التوقع من وجهة النظر الرياضية يتلخص بكونه على وتيرة واحدة ، إذن فما هو الشيء الذي سيجده مستحدثاً وممتعاً . إذا كان الشيء جديداً فيجب أن يكون قابلاً للتمييز عما هو قديم ، وإذا كانت الاصوات قابلة للتمييز ، فيجب أن تكون مألوفة الى حد ما .

نستطيع أن نجد في اصدقائنا المقربين ما هو مميز في كل منهم بينما لا يكون وضع الغرباء مشابهاً . يمكننا أن نميز بين الصيني والافريقي بالطبع ، إلا أننا سنجد صعوبة بالغة في التمييز بين الصينيين أنفسهم ، وب نفس الطريقة نميز بين الضجيج الفاوسي والموسيقى الرومانسية ، إلا أن هذا لا يمنحنا قاعدة واسعة للتنوع ، فكل الضجيج الفاوسي يبدو متماثلاً بالنسبة اليها .

تبدو معظم المؤلفات الموسيقية للقرن الثامن عشر متماثلة بالنسبة لعشاق المؤلفين الرومانسيين ، وكذلك يبدو بالنسبة اليهم مؤلف احوارد غريغ المسمى : مقطوعة هولبيرغ مماثلاً لموسيقى القرن الثامن عشر وان كان في واقع الامر مشابهاً لها بشكل ظاهري فقط . تبدو موسيقى الكورال من القرن السادس عشر رتيبة وغير مميزة حتى بالنسبة لعشاق القرن الثامن عشر . اعلم ان هذه القاعدة تعمل بشكل معاكس ايضاً اذ ان بعض انصار موتزارت يجدون فردي مما بينما يجد المتحمسون لتنوع الموسيقى عند فردي مجرد صخب وضجيج في الموسيقى المعاصرة .

يرغب المؤلف بان يكون حراً واصيلاً ؛ الا انه يرغب ايضاً بان يكون معروفاً . اذا لم يستطع متذوقوه التمييز بين اعماله فلن يقبلوا على شراء تلك الاعمال ، واكثر من ذلك إذا لم يستطيعوا تمييز اعماله عن جملة اعمال المؤلفين آخرين ، فسيكتفوا عند ذلك بتسجيل واحد كممثل للمجموع .

كيف يستطيع المؤلف اذن جمل مؤلفاته مميزة بالنسبة الى الجمهور؟ ربما بالحفاظ على سرعتها المعلوماتية والانتروبي الخاصة بها ضمن حدود القابليات الانسانية للتمييز . يمكن للمؤلف المذكور تحقيق هدف التمييز ايضاً بتنويعه للانتاج ضمن سرع تكافى عدد من واحداث البيت في الثانية ، وبدا يتمكن الآخرون من ملاحظة الاختلاف بين اعماله .

هل يعني ذلك ان بإمكان المؤلف الحاسب ، أي نظري المعلومات والمؤلف في نفس الوقت ، انتاج متتالية بسيطة وبطيئة من النوتات الموسيقية المنتقاة بشكل عشوائي . كلا بالطبع ، تماماً كما هي حال الكاتب اذا انتقى سلاسل من الاحرف بشكل عشوائي . ان ما سيفعله المؤلف الموسيقي هو اشادة عمله على واحداث اكبر مالوفة بالنسبة للجمهور من خلال الخبرة المتكونة عبر الاستماع الى المؤلفين الآخرين . وستكون هذه الواحدات مرتبة بشكل يمكن المستمع الى حد ما من توقع اللحن التالي دون وضعه خارج المسار طول الوقت . ربما ان المؤلف

سيحاول مفاجئة المستمع بين حين وآخر ، إلا أنه لن يفعل ذلك على الدوام ، كما أن المؤلف سينجح الى تقديم ماهو جديد ولكن بمعدلات ضئيلة ، وسيعمل على تعويد المستمع على هذا الجديد ومن ثم تكراره بعد فترة في ثوب مغاير .

يستخدم المؤلف الموسيقي لغة يعرفها المستمع ، تماماً كما هي الحالة في اللغة العادية . اذ ينشأ سلاسل مرتبة من الكلمات الموسيقية وفق قواعد موسيقية امرائية دقيقة . يمكن أن تكون هذه الكلمات انغام متألفة او مدرجة ، او لحن رئيسي او تزييني . وسوف تتالى في جمل مكررة بشكل نسيق تنطق بها آلات الاوركسترا . اذا كان المؤلف حلاقاً فسينجح في نقل مشاعره الشخصية المميزة الى المستمع المرهف . واذا كان في الحد الأدنى حرفياً فسياتي مؤلفه معتدلاً ومقبولاً .

لم نأت بجديد حتى الآن ، اذ أن بإمكان حتى أولئك البعيدين عن نظرية المعلومات اعادة ما قلناه في جمل مختلفة . إلا أنه يبدو لي على كل حال أن هذه الحقائق ستكون أكثر اهمية عندما يواجه المؤلفون الموسيقيون وغيرهم من الفنانين التنوع الهائل في المصادر التكنيكية المثيرة والمخيفة نوعاً ما .

سينزعون للوهلة الاولى الى الاختيار الحر المستند الى قاعد قمرية . لقد دهش م. ف. ماثيوز من مختبرات بيل اقراء قدرة الكمبيوتر على خلق أي تشكيل موجي استجابة لبعض التعليمات المفداة اليه ، لذا عمد الى تصميم برنامج يميز كل نوتة موسيقية على بطاقة معينة وفق شكل موجتها ، زملها ، خطوطها ، وعلوها . انتقل ماثيوز مدفوعاً بفرح غامر الى مطالبة الكمبيوتر بانتاج مقاطع وسيقية لم تعزف وكان ذلك ، ومع أن المقاطع المنتجة كانت بسيطة إلا أنها كانت فوضوية .

يستطيع المؤلفون الكبار من امثال فارسيه تحريك المشاعر بشكل ونمط معين وذلك عن طريق مزج كل انواع الاصوات المسجلة والمعدلة

وفق المدرسة الواقعية في الموسيقى . لقد انتجت عدة أعمال موسيقية باستخدام الامكانيات الالكترونية ؛ الا ان المؤلفين لم يلاقوا يعان من صعوبات كبيرة عند تخليهم عن المصادر التقليدية .

اذا رغب المؤلف بالحفاظ على جمهوره فما عليه الا تبسيط مؤلفاته وكتابتها بالطرق التقليدية ، كما ان بإمكانه وغيره من المؤلفين تربية وثقيف الجمهور بحيث يصبح من الممكن تذكر وتمييز المصادر الجديدة لأعمالهم ، او ان على المؤلف مواجهة خيار آخر ببقائه مغموراً وانتظار الاجيال القادمة بهدف اصدار حكم عادل عليه . على كل حال تبقى هناك خيارات أخرى خاصة اذا كان المؤلف عبقرياً .

هل لدى نظرية المعلومات ما يمكن ان تمنحه الى الفنون ؟ اعتقد ان ليس لديها الا القليل مما هو مهم فعلاً لعرضه باستثناء وجهة نظر وهي وجهة نظر مهمة سنخصص لها ما تبقى من هذا الفصل .

تناولنا اللغة في الفصل الثالث والرابع والثاني عشر . تتألف اللغة من أبجدية او معجم من الكلمات اضافة لاحكام او قيود قواعدية تتعلق بكيفية استخدام الكلمات وربطها ببعضها . لقد تعلمنا التمييز بين مظاهر النصوص المتنوعة التي تفرضها القواعد والمعاجم اللغوية وتطرقنا كذلك الى الحرية الفعلية التي يمارسها الكاتب او الناطق . وتأكدنا ان عنصر الخيار هذا هو المسؤول الوحيد عن القيمة المتوسطة للمعلومات في كل كلمة . وبيننا كيف توصل شانون الى حساب هذه القيمة بما يتراوح بين ٣.٣ الى ٧.٢ بيت لكل كلمة . يشكل هذا الخيار أيضاً القاعدة الصلبة التي يتمكن الكاتب او الناطق بالاستناد اليها من نقل الافكار والمعاني التي يرغبها .

تتسم المعاجم اللغوية بكونها واسعة ، على الرغم مما سبق وأوضحناه في الفصل الثاني عشر من ان عدد قليل من الكلمات فقط يشكل الجزء الاكبر من اي نص . اما القواعد اللغوية فهي من الصعوبة بمكان لدرجة انها لم تصغ بشكل كامل حتى الآن . ومع ذلك ، يمتلك الكثيرون معاجم لغوية واسعة ويحيطون بالقواعد بشكل يمكنهم من الانشاء اللغوي المتميز .

نجد من المعقول أن نفرض وبشكل مماثل معرفة واسعة بالعناصر الموسيقية من قبل من يصفون للموسيقى في تأمل وتذوق عاليين . لا يعني ذلك أن نطالب مثل هذا المستمع بصياغة القواعد الموسيقية ، مثلما نحجم عن مطالبة الكاتب ببناء أحكام القواعد اللغوية ، وكذلك ليس من الضروري أن يؤلف للموسيقى وفق القواعد بأكثر مما قد يطلب من أبكم يفهم ما يسمع في مجال النطق . ومهما يكن من أمر فسيبقى لديه حد أدنى من المعارف الموسيقية يستطيع بواسطتها فهم ما يسمع .

كان هذا هو ما أردته عندما اشرت الى معرفة لغة الموسيقى أو أسلوب الموسيقى ، أي على وجه التحديد معرفة عناصر وأحكام الموسيقى لامة أو فترة محددة ، أو مدرسة موسيقية معينة . وسواء اذا كانت الاحكام الموسيقية مستندة أو غير مستندة الى قوانين الفيزياء فإن الالمام بها يحتاج الى سنوات طويلة من التدريب المضني كما هو الامر في حالة اللغة المنطوقة . ان المامنا هذا هو الوحيد الكفيل بتمييز أسلوب وخصوصية عمل معين سواء اكان ادبياً أو موسيقياً . تبدو الاصوات الموسيقية للأذن غير المدربة وكأنها منتقاة من عدد لا نهاية له من الاصوات الممكنة وليس فقط من قطاع محدد من الاصوات المعروفة ، وكذلك ستبدو لنفس الأذن القواعد الموسيقية ممثلة للخيار والتنوع . وهكذا سيهزم التعقيد الموسيقي الجمهور غير المدرب أو الجمهور الذي تعود لغة موسيقية مخالفة .

يجب ان نتذكر ان بإمكاننا كتابة جمل ذات معنى حتى لو خالفنا القواعد اللغوية . يشبه وضع الموسيقى ذلك إذ ان بإمكاننا تقدير موسيقى غريبة نوعاً ما بالنسبة لخبراتنا . وبالمقابل يمكننا كتابة جمل صحيحة من حيث القواعد إلا أنها لا تحمل بين ثنياتها أي معنى محدد ، ساقف عند هذه الامكانية الأخيرة للحظة . علينا أولاً أن نلاحظ أنه في نفس الوقت الذي يمكننا فيه كتابة جمل ذات معنى وصحيحة وفق قواعد الاعراب ، إلا أن ذلك غالباً ما يعرضنا لتحديق الآخرين في نقص كفاءتنا كوننا كنا واضحين في التعبير .

لن يكون جديداً اذا استفينا عن المعنى بشكل كامل مع ابقاء معجم معقول وبعض او كل القواعد . وهكذا زود موتزارت الاجيال بفواصل موسيقية في  $\frac{3}{4}$  الزمن اضافة لمجموعة من القواعد . اذا عمدنا الى قذف النرد للحصول على سلسلة من الارقام العشوائية وانتقاء الفواصل وفق القواعد فاننا سنستطيع تأليف عدد لا نهاية له من مقطوعات الفالس حتى لو افترقنا الى الخبرة في التأليف الموسيقي ، وستبدو مؤلفاتنا شبيهة بموتزارت غير منظم . يعطي الشكل ١٣ - ١ مثالا في هذا المعرض .

### موسيقى عشوائية



الشكل ١٣ - ١

يقال ان بعض المؤلفين الكبار قاموا بتأليف موسيقى غير منظمة من هذا الطراز ، ومنهم جوزيف هايدن ، ماكسيميليان ستارلر ، وباخ . استخدم جون كيج وهو مؤلف متأخر العمليات العشوائية لانتقاء سلاسل من النوتات الموسيقية .

قمت انا وزوجة كلود شانون عام ١٩٤٩ ، ودون ان ندرى بالاعمال العشوائية المشار اليها بتأليف موسيقى ابتدائية احصائية او عشوائية . نظمنا اولاً جدولاً بالانغام المسموحة في المقامات ١ - ٤ من مفتاح سي . لقد تضمن الجدول في الحقيقة انغام المقام ١ فقط اذ استخرجت الانغام الباقية من هذه وفق قواعد محددة . تم انجاز عدد من المؤلفات باستخدام جداول للاعداد العشوائية وقذف ثلاثة احجار نرد صنعت خصيصاً .

كانت القاعدة الوحيدة المستخدمة في هذه المؤلفات لربط الانغام مع بعضها ، هي قاعدة ربط النغمين اذا كان لهما نفس اللون في نفس الطبقة . لقد جعل هذا الشرط بقية الانغام تقفز هنا وهناك بشكل غير مرضٍ . يقابل ذلك استخدام الاحتمالات البسيطة وغير الصحيحة في انشاء النصوص كما سبق والمحنا في الفصل الثالث .

وعلى الرغم من التشكيل القصير المدى لهذه المؤلفات البدائية فقد حاولنا ان نجعلها معقولة ومقبولة وقابلة للتذكر ، بل وذات مدى بعيد .

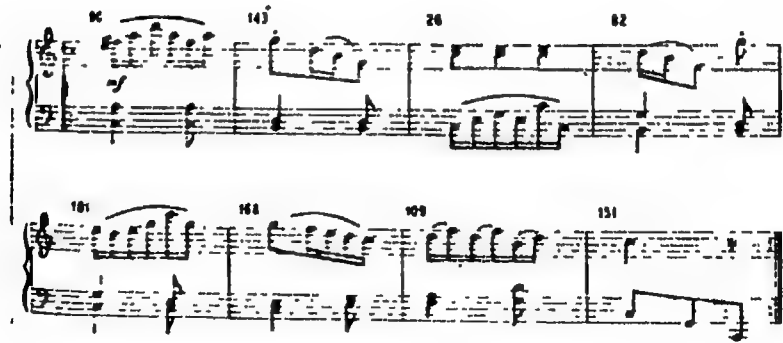
وهكذا فقد تكون كل مؤلف من ثمانية مدرجات بمقياس  $\frac{4}{4}$  ،

وتم التوصل الى المدى البعيد بجعل المدرج ٥ مكرر المدرج ١ والمدرج ٦ مكرر المدرج ٢ ، بينما اختلف المدرجان ٣ و ٤ عن المدرجين ٧ و ٩ . اذن فالمؤلفات كانت من نوع الروندو الابتدائي . كما تم تصنيف الانغام ١ ، ١٦ ، ٢٢ في المقام الاول بينما الانغام ١٥ ، ٣١ أما في المقام الرابع او الخامس . وذلك بهدف اظهار اثر ايقامي .



لقد شابهت مؤلفاتنا التراتيل ، على الرغم من انها روندو اصولية .  
يبين الشكل ١٣ - ٢ احد هذه المؤلفات ، وقد ذهبنا ابعد من ذلك  
بتحديد كلمات لهذه التراتيل ، وكل المؤلفات الاخرى تشبه ذلك الموضح  
في الشكل ١٣ - ٢ وهي بالطبع من تأليف نفس الملحن ، الا انها بعد  
عدد من مرات الاستماع ستبدو مختلفة . ومن الطريف حقا انني بدأت  
اتعلق بهذه الموسيقى بعد سماعي اياها لمرات كثيرة . ولاشك انها ستقع  
بشدة على اذني موسيقي مرهف .

قام دافيد سليبيان ، وهو عالم معلومات سبق أن ذكرناه ، بعمل  
آخر عام ١٩٥١ . فقد استخدم ، باتباع شاتون ، المعلومات الاحصائية  
عن الموسيقى المتوفرة لدى علماء الرياضيات الذين يفتقرون للخلفية  
الموسيقية . عرض على الشخص المختبر ربع علامة ، نصف علامة ، او  
ثلاثة انصاف العلامة من مؤلف موسيقي وطلب منه اضافة نصف علامة  
معقولة ، ثم ابرز المحصلة الى شخص آخر طالبا منه اضافة نصف علامة  
اخرى وهكذا . وسبق ان اخبر هؤلاء الاشخاص بطابع المؤلفات الموسيقية  
المعنية .



الشكل ١٣ - ٢

قدمت في الشكل ١٣ - ٣ نموذجين ، الاول موسيقى كورالية بنيت على اساس اضافة نصف علامة استناداً لنصف العلامة السابق ، والثاني موسيقى رومانسية انشأت باضافة نصف علامة بالاعتماد على الانصاف الثلاثة السابقة . اعجب في الواقع وبشدة كيف أن هذين المؤلفين يظهران كما هما عليه رغم عدم الانسجام والتوافق بين الانغام المتتالية فيهما . ان طابع الموسيقى في هذين العملين ملفت النظر ايضاً ، فعلى ما يظهر كان لدى الرياضيين افكار قليلة عما يناسب الموسيقى الرومانسية وعما يناسب موسيقى الكورال .



### الشكل ١٣ - ٣

توضح تجارب سليبيان مرونة الكائن الانساني واخطاؤه . صحيح ان العمليات العشوائية تبدو متسقة الا انها باهتة وعديمة الروح ، وقد استخدم بعضها في التأليف الموسيقي .

الآء أنه ليس من شك في قدرة الكمبيوتر على إنتاج موسيقى عشوائية تشبه موسيقى مؤلف معين اذا غذي منذ البداية ببعض الاحصائيات المميزة لطابع هذا المؤلف يوضح هذه الامكانية طابع موسيقى الحضانة المبتكر من قبل بينكرتون وتنسوع الطوايع المستحضر من قبل هيلر وايزاكسون والتي سأتعرض لها فيما يلي .

نشر ريتشارد . س . بينكرتون عام ١٩٥٦ في مجلة العلم الامريكي بعض القواعد البسيطة لكتابة الالحن . اوضح بينكرتون كيفية اختيار علامة موسيقية على اساس احتمال ورودها بعد علامة معينة ، ومدى تغير هذه الاحتمالات بتغير الموقع في المدرج الموسيقي . كما حسب الانثروبي لكل علامة باستخدام الاحتمالات المستخرجة من طابع موسيقى الحضانة ووجدتها مساوية لـ ٢٨٨ بيت ، واعتقد شخصيا أن هذا الرقم اكبر مما يجب . اعتبر بينكرتون آلة متناهية الحالات بإمكانها إنتاج الالحن العادية ، كما فعلت نفس الآلة في الشكل ٣ - ١ عندما انشأت الجمل اللغوية .

استند كل من بروكس ، هوبكنز ، نويمان ، ورايت الى موسيقى التراثيل ونشروا بحثاً عام ١٩٥٧ حول الجانب الاحصائي للتأليف الموسيقي .

اعلنت مؤسسة بوروز عام ١٩٥٦ أنها عهدت للكمبيوتر بتأليف الموسيقى ، كما اعلن عام ١٩٥٧ أن الدكتور بوليشو والدكتور كلاين استخدموا كمبيوتراً كبيراً لتأليف الالحن الموسيقية . وقد الف جاك . اوينز كلمات لاحد هذه الالحن وأذيعت من التلفزيون الامريكي فعلاً . وقد حذا الكثيرون هذا الحذو في التأليف الموسيقي .

ومهما يكن من امر فان التأليف الموسيقي الجدي بواسطة الكمبيوتر لم يشاهد النور الا على يد هيلر وايزاكسون من جامعة الينوي ، فقد نجح هذان العالمان في صياغة قواعد النوعيات الاولى من اربعة اقسام والتي مكنت الكمبيوتر من اختيار النوتات الموسيقية بشكل عشوائي الا اذا خالفت القواعد حيث كان الكمبيوتر يرفضها .

اقتصرت القواعد على العلاقات المباشرة بين ثلاثة نوتات متتالية باستثناء الايقاع الختامي ، لذا تراوحت الموسيقى عبر مجالات واسعة ، وان كانت جيدة ضمن مجالات ضيقة ، لا بل كانت مذهشة أحيانا في تلك المجالات . يوضح الشكل ١٣ - ٤ نموذجا من هذه الموسيقى .



#### الشكل ١٣ - ٤

ذهب هيلر وإيزاكسون أبعد من ذلك في محاولتهما اثبات قدرتهما على جعل الكمبيوتر يُولف الحاناً ديناميكية ومتناغمة وكذلك على تحقيق التأليف الموسيقي وفق سلاسل ماركوف ، حيث يتم الاختيار المتتالي للنوتات الموسيقية استناداً لتوابع احتمالية محسوبة بدورها من جداول منظمة وفقاً لاعتبارات التنغم الموسيقي . انتج العالمان بذلك خواص موسيقية جيدة .

لقد جمع هذا العمل الموسيقي وبيع تحت اسم مقطوعة إلياك لريامي وتري ، وكما أوضحنا فهذا العمل خصائص متميزة في مقاطعة الملحية الا انه ضعيف وشديد التراوح اذا أخذ ككل - ولو فرض على العمل نموذج معين او كررت فيه بعض المقاطع لتحسن بشكل ملحوظ . ان لهذا طابعاً تقريرياً حاسماً تماماً في التكرارات في موسيقى الروندو ، او كما هو الامر في قواعد شومسكي التي شرحناها في الفصل الرابع . يجب ان نتوقع على كل حال استحالة تأليف موسيقى ذي مدى واسع بمجرد استخدام النوتة السابقة او ربما عدة نوتات سابقة في حساب احتمال النوتة التالية ، فالعلاقة المطلوبة يجب ان تربط أجزاء العمل وليس النوتات المفردة .

يؤكد عمل هيلر وايزاكسون ان بإمكان الكمبيوتر تأليف بعض الاعمال الموسيقية التي كانت مقصورة على الانسان فيما مضى . اصف الى ان بعض المؤلفين غير المهوبين قد يلجأون للكمبيوتر لدى كتابتهم لعمالهم الموسيقية ، وما يفعله أحدهم هنا هو توجيه التأليف العام وترك مهمة ملء التفاصيل للكمبيوتر . كما انه يمكن استخدام الكمبيوتر لتجريب قواعد جديدة للتأليف قد يصعب على المؤلف للوهلة الاولى تجربتها والاعتياد عليها .

نسمع في هذه الايام ان علم السيبرنيتيك سيتحفظنا بالآلات يمكنها ان تتعلم . اذا كان بإمكان هذه الآلات ان تتعلم بأسلوب صعب بكل ما تعنيه هذه الكلمة ، فلماذا لا تتعلم ما نرغب منها ان تتعلمه حتى عندما نكون عاجزين عن معرفة أنفسنا . وهكذا اذا فرضنا على الكمبيوتر نظام مكافآت وعقوبات تبعاً لنجاح محاولاته او فشلها ، نستطيع انذاك وضعه في شروط تمكنه من انتاج موسيقى اسبانية او كلاسيكية وفق هوانا . لاشك ان هذه الافكار مثيرة للغاية ، وقد تبدو عديمة المعنى في عصرنا وربما ستبقى كذلك لعدة مئات قادمة من السنين .

ليست الموسيقى هي كل الفن ، وان كنت قد بدأت بها فلانها تعرض بشكل غير عادي بعض الافكار المشتقة من نظرية المعلومات ، علماً بأن



ومراوحة على لسان احد ابطاله في رواية : الارض القرمزية ، اذ يتحدث هذا البطل فيقول : لا يصل العلم آنسلمو الى نهاية اي قصة ابداً لانه دائماً يتحرك نحو ارض جديدة .

يمكن أن نضيف على النصوص المنشأة بهذا النحو العشوائي سمة النظام الجديد بأن نطلع الاشخاص الذين يضيف احدهم كلمة في كل مرة على عنوان مسبق ومعتمد للنص .

اطلعتني الدكتور دونالد . هـ . دون من مختبر ستانفورد للالكترونيات على مثال لبناء نص بشكل عشوائي بحيث يضيف احد الاشخاص كلمة في كل مرة بعد اطلاعه على آخر كلمة موجودة في النص ، اضافة لمعرفته بعنوان النص : الرجال والنساء .  
وقد اتى النص على النحو التالي :

« احبت حواء بشدة عاطفية او غير كلي في الليلة في أي مكان تموت فيه قبل البلوحة مرة ثانية ومهما جبي أساء » .

اما من تجارب شركة بيل فنعرض النص التالي المنشأ وفق نفس القاعدة السابقة مع فارق إطلاع الشخص على الكلمات الثلاثة الأخيرة بدلاً من اطلاعه على الكلمة الأخيرة فقط . والنص هو :

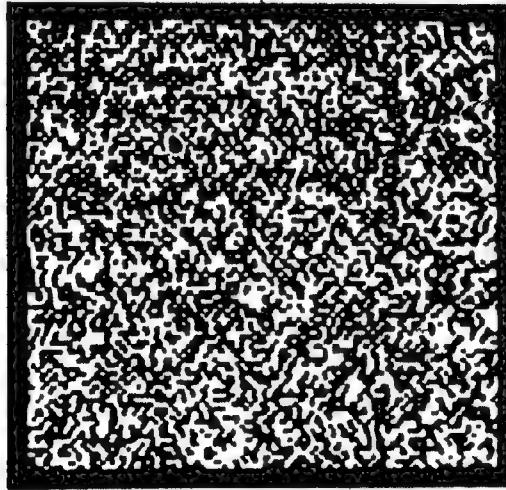
عن الحياة

« الحياة تملك عدة رجال حكماء وعقلاء نادراً ما يلومون البلهاء بشكل سطحي . قد تتعجب لماذا . المشاعر الإنسانية ولكن القبائل البدائية وجدت » .

لا شك ان قراءة هذه النصوص ستترافق بضحكت السخرية والتهكم ، اذ لا يمكن لإنسان عاقل أن ينشأ مثل هذه النصوص . ينتقي الشعراء قليلو الموهبة كلمات لا ارتباط بينها من أجل تحقيق القافية وهم لا ينتمون عادة أي بيت شعر جيد . ذكرنا ذلك لنؤكد انه قد تكون للعملية العشوائية بعض الحظ في انشاء نصوص جيدة بالمقارنة مع هؤلاء الشعراء .

هل يتمكن الكمبيوتر من انتاج نص واضح الميزات باستخدام احكام القواعد وسلاسل الاعداد العشوائية ؟ قد يستطيع إنشاء كلمات مضحكة بل ونصوص مضحكة تسبب صدمة للقارئ . نستطيع ان نبحر بخيالنا ما شئنا فنتصور كومبيوتر قد جهز بكل عناصر القصة البوليسية ، وانصرف الى تأليف قصة بوليسية بعد ذلك ، ما عساها تكون تلك القصة . على كل حال ليست هذه إلاّ تصورات وتخييلات .

يمكن توظيف الفنون البصرية لتوضيح نفس النقاط التي اتينا على ذكرها في حالة اللغة والموسيقى . وفعلاً فالتشكيل البصري العشوائي هو من وجهة النظر الرياضية الأكثر إدهاشاً والأقل احتمالاً من كل التشكيلات البصرية تماماً كالتشكيل العشوائي المكون من الأحرف الأبجدية او الموجات الصوتية : وللأسف فالتشكيل العشوائي هو تشكيل باهت ، وتبدو التشكيلات المختلفة بالنسبة للعين الانسانية متطابقة دون فروق واضحة بينها . اعرض في الشكل ١٣ - ٥ ١٠٠٠٠ بقعة بيضاء وسوداء موزعة بشكل عشوائي في محاولة لتأكيد هذه الفكرة.



الشكل ١٣ - ٥

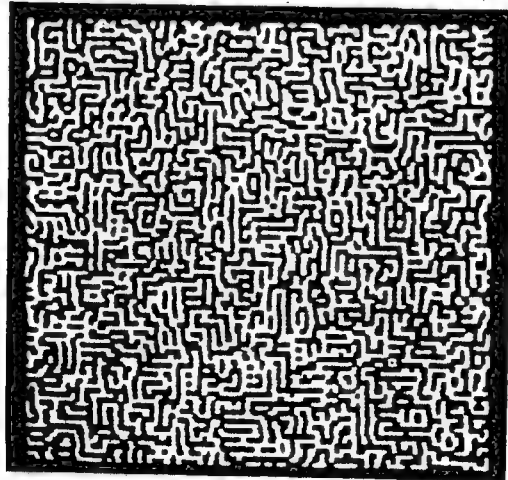


إن التشكيل الأخير في الشكل ١٣ - ٥ هو في واقع الأمر من صنع الكمبيوتر لإنشاء هذا التشكيل ضمن دراساته للإدراك الجسم ومعنى الكمبيوتر ، إذ استطاع بيلا جولز العامل في حقل الإدراك أن يدفع النموذج . ذهب جولسز أبعد من ذلك ببرمجة الكمبيوتر للتخلص من العشوائية في هذا النموذج ما أمكن ، وأشد فكرته على جعل الكمبيوتر يتفحص وعلى التتابع مجموعات مكونة من أربعة نقاط متمركزة حول نقطة معينة .

إذا طابق المراكز في لونه ( أبيض أو أسود ) أحد زوجين من النقاط يجري إبدال لونه إلى الأسود إذا كان أبيضاً ، وإلى الأبيض إذا كان أسوداً . يحقق ذلك حذف الأقطار السوداء أو البيضاء إلا عندما يكون أحد الزوجين أبيضاً والآخر أسوداً أو العكس .

إن اعتماد هذه الطريقة في اختزال العشوائية بغضبي بنا إلى الشكل ١٣ - ٦ حيث يبدو المظهر العام وقد تحسن فعلاً . حقاً إن عنصر العشوائية مطلوب لتأمين التنوع والمفاجأة ، إلا أن النظام هو الوحيد الكفيل بإحداث البهجة .

يمود استخدام العشوائية والنظام في الفن إلى عهود قديمة . يقدم المشاكل تأثيرات مبهرة باعطاء تشكيلات عشوائية من قطع الزجاج تناظراً سداسي الأوجه .



الشكل ١٣ - ٦

حقق أحد الرسامين منذ عدة سنوات لوحة جديدة باستقاط عدد من الخيوط على قطع سوداء من الشيايب وتثبيتها ومن ثم تطيرها وفق وضعها العشوائي . كما حقق فنان سويسري باستخدام الكمبيوتر لوحات ملونة مزيج من النظام والعشوائية بيع الكثير منها بأثمان عالية .

زودني كل ذلك برؤية فلسفية اصغرية للفن والتي لن أعزوها الى نظرية المعلومات . وقد وصفت هذه الفلسفة بكونها اصغرية لانها تهمل عن عمد الموهبة والمبقرية وهما العاملان الوحيدان اللذان يجعلان من الانتاج الفني قضية كبيرة .

يسلزم الفن الناجح تقدير الجمهور وموهبة الفنان . يتأثر الناس بعوامل كثيرة غير تلك التي تواجههم عند تأملهم العمل الفني . واذا حاول شخص ما مقاومة فعل العمل الفني ، فلن يحركه شيء وسيبقى بارداً على الدوام ، وعلى العكس اذا اقتادته رغبة المديح فسيمتدح حتى الاعمال الفنية المتوسطة . مثلاً أنا أحب شخصياً أعمال التراويل الموسيقية انتي الفتها بالاشتراك مع زوجة شاتون . وفي كثير من الأحيان يفضل بعض المؤلفين أعمالهم الضعيفة . أيضا قد تذهب الجماعات الصغيرة والكبيرة على حد سواء الى تقدير الموضة القصيرة الأمد والتي لا تملك اي ميزات فعلية .

يجنح الجمهور من ضمن اشياء اخرى الى تحسس روح الخلق والابداع واكتشاف المعاناة الذاتية من خلال الاعمال الفنية . يجب على العمل الفني ان يملك اتساقاً بالغاً حد الكمال كي يجلب الاحترام لصاحبه ويعكس هويته الحقيقية .

نفرض أن فناناً ما استطاع انتاج كل الاعمال العظيمة التي تقبلها اليوم على انها من ابداع اسماء كبيرة ومتباينة الطابع من عالم الفن ، وذلك قبل ولادة كل هؤلاء الفنانين . طبعاً سيدهشنا ذلك ، إلا أن هذا الفنان لن ينتزع اعجابنا بسهولة ، ولن نقف منه موقف الاحترام الذي نقفه من كل عمل على حدة كونه يعكس هوية وذاتية محددين . نستطيع

تميز بيكاسو رغم انه غير مريح . لقد كان حاذقاً في طوابع متعددة ، لذا يصعب إصدار حكم متميز عليه . ما أسهل بالمقابل أن تقدر الفنان ماتييز .

يتوقف تقدير الجمهور للفن على كون الفن مفهوماً من قبل هذا الجمهور . مثلاً النكتة الصينية لن تضحك إلا عدد قليل من الأمريكيين ، كما أن عشرة نكات صينية لن تكون مضحكة أكثر من إضحاك نكتة واحدة . إذا كان للفن أن يعطى حق قدره فيجب أن يصلح الى درجة ما في نفس لغة الجمهور ، وإلا فمهما انطوى على التنوع ، لن يرى الجمهور فيه إلا الرتابة والتكرار . إن دهشتنا المتكررة لا يمكن أن تتحقق إلا بالمقارنة على خلفية الاعتياد وليس بالفوضى العشوائية .

يتبنى بعض الفنانين لغة تعلمها جمهورهم على أيدي أساتذة سابقين ، وكان يوهان براهمز واحداً من هؤلاء ، بينما يذهب البعض الآخر الى تعليم جمهورهم لغة جديدة ، كما فعل الفنانون الانطباعيون . لا شك أن لغة الفن تتغير على الدوام ، ول كبار الفنانين علينا منة في هذا المجال اذ يعلموننا على الدوام لغات جديدة . لا يعني ذلك أن نتنكر لأصالة بعض الفنانين الكبار من أمثال باخ وهاندل ، الذين الفوا موسيقاهم بلغة الماضي .

إذا كانت اللغة ذات الكلمات الواضحة والعلاقات البينة ضرورية للفن فهي ليست كافية . إن التماثل الميكانيكي باهت ومخيب . وأفضل شخصياً مفاجآت النشر العشوائي على الشعر المضجر لإوين ميريديث . ربما ستجد الإنسانية في الفن العشوائي البديل المنشود لايتلأل الفن الحرفي في عصر انهيار الفنون .

نكتفي بهذا القدر من نظرية المعلومات والفن .



## الفصل الرابع عشر

### حدود إلى نظرية الاتصال

انه امر مفرح بكل تأكيد ، ان تساهم فكرة جديدة بحل جملة كبيرة من المشاكل ، إلا ان الفكرة الجديدة لن تستأهل الوقفة عندها ما لم تبرهن ان لها قيمة عملية مهما كانت تلك القيمة محدودة .

انتقدني احد الباحثين في نظرية المعلومات لانني سبرت في هذا الكتاب إمكانية تطبيق نظرية المعلومات في مجالات اللغة ، علم النفس ، والفن ، فبالنسبة له تبدو العلاقة بين نظرية المعلومات وكل من فروع المعرفة هذه علاقة هامشية وضبابية . لماذا تنتزع القارئ من تطبيقات نظرية المعلومات المثبتة والاكثر اهمية لنجنيح به نحو تطبيقات اخرى غير واضحة المعالم وقليلة الاهمية على الاقل في الوقت الحاضر ؟

يعود ذلك من جهة ، لرغبة عارمة دفعتني لشرح العلاقات الممكنة بين نظرية المعلومات في إطارها المحدد والضيق وفروع أخرى من المعرفة ظهرت علاقتها بهذه النظرية من خلال كتابات الآخرين . ومن جهة أخرى اعتقد ان نظرية المعلومات تساعدنا كي نتحدث بشكل معقول او على الاقل في إبعادنا ما امكن عن الحديث غير المعقول ، بصورة خاصة في مجال اللغويات والفن وعلم النفس . ومهما يكن من امر فهناك خطر كبير من الانزلاق وراء التأكيد على هذه القضايا عبر كتاب يتحدث عن نظرية المعلومات .

نؤكد على الخطأ الفاحش الذي نرتكبه اذا اعتقدنا ان اهمية نظرية المعلومات تنبع من ارتباطاتها العريضة مع فروع كثيرة كاللغة ، السيبرنيتيك ، علم النفس ، والفن . ان ترسيخ هذا الاعتقاد ما هو إلا تكرار لأغلاط ارتكبت بحق اكتشافات أخرى مهمة .

وهكذا فقد أحيط عمل نيوتن في عصره بجدل فلسفي ومعرفي ، وارتبط لعدة سنوات تالية بشمولية مزعومة أساءت لطبيعته الحقيقية . إلا أن أينشتاين استطاع أن يرى بوضوح أكثر عندما أكد بأن العقل ضعيف ومحدود اذا ما قورن على خلفية مهمته اللانهائية ، ومضى بعد ذلك واصفاً عمل نيوتن بأنه حقق الهدف المنشود المتمثل بولادة علم الميكانيك السماوي والذي تم تأكيده آلاف المرات من قبل نيوتن نفسه ومن تلاه .

والعدالة تقول ان ميكانيك نيوتن كان فعالاً منذ أيام نيوتن وساهم في حل مشاكل لم يكن ليتخيلها نيوتن ومعاصروه ، إلا أن هذا الميكانيك لم يتمكن من حل كل مشاكل العلم ، كما تصور بعض الفلاسفة المتفائلين .

يبدو لي المضمون الهام الأكيد لنظرية المعلومات بسيطاً وواضحاً . فهي تنطوي على أفكار السرعة المعلوماتية او انتروبي المصادر المستقرة ، السعة المعلوماتية للأقنية ذات الضجيج وبدون الضجيج ، وكذلك الترميز الفعال للرسائل التي يولدها المصدر بحيث يتحقق البث الخالي من الأخطاء وبسرعة تساوي سعة القناة . اما عالم نظرية المعلومات فهو عالم أنظمة الاتصالات الكهربائية المتضمن للأساليب الذكية في تصميم تلك الأنظمة .

أجد من المناسب في ختام هذا الكتاب أن أبتعد عن الممكّنات ( او المستحيلات ) المحتملة ذات الطابع العام وأن أطرح عوضاً عن ذلك السؤال التالي : ماذا فعل باحثوا نظرية المعلومات وماذا يفعلون أبعد من هذا الكتاب ، بكلمات أوضح ، ماذا فعل هؤلاء الباحثون لتأهيل نظرية المعلومات . كعلم متماسك صلب يمكن قبوله أبعد من وضعه الحالي كمجموعة نبوءات تدور حولها المناقشات .

نجد هنا مجالاً واسعاً من الأبحاث يستلزم عرضها كتاباً آخر .  
لذا سيقصر هذا الفصل على عرض موجز لأعمال نظريي المعلومات بعيد  
نشر شانون لبحثه الأول ، كما سيحاول تعريف القارئ بأهداف نظرية  
المعلومات في إطارها الضيق ، وأخيراً سيبحث القارئ على متابعة هذه  
النشاطات بتفصيل أكبر .

سعى باحثوا نظرية المعلومات الى تطبيق آخر لانتروبي السرعة  
المعلوماتية لمصدر رسائل غير ترميز وبث المعلومات . يرمي الرجال  
الطموحون الى إعطاء الصورة معنى أكبر ، أما الأكثر تواضعاً فيقنعون  
بأي تطبيق صحيح ذي معنى .

كان التطبيق الوحيد في هذا السياق هو ذلك الذي قدمه ج. ل.  
كيلبي الابن عام ١٩٥٦ . يتعلق هذا التطبيق بالمقارنة على أحداث عشوائية  
حيث يملك المراهن معلومات داخلية عن خرج الحدث الذي سيراهن  
عليه . نستطيع أن نتخيل مثلاً أن أحجار النرد قد قدفت للتو ( أو أن  
السباق قد ابتدأ ) وأن المراهن المفضل يعلم ذلك وقد تلقى بعض  
المعلومات من النتائج ، إلا أن الشخص الذي سيراهن معه لا يعرف ذلك  
ويعطي المراهن فرصاً عادلة على أساس احتمالات النتائج .

يتلقى المراهن معلوماته هذه على شكل واحدات متتالية من البيت  
أي جملة وجود من طراز نعم أو لا على مجموعة أسئلة مطروحة . يمكن  
مثلاً لمعطي المعلومات أن يخبر عما إذا استقرت قطعة النقد على الطرة  
أو النقش بإرسال بيت واحدة من المعلومات ، أو يمكن لهذا المعطي أن  
يخفض النتائج الممكنة لرمي حجر النرد من ٦ الى ٣ بإرسال بيت واحدة  
من المعلومات تعلم المراهن عما إذا كان الوجه السطحي لحجر النرد  
زوجياً أو فردياً .

إن خير وسيلة لشرح عمل كيلبي بعد هذه المقدمة هي سرد موجز  
هذا العمل : إذا كانت رموز الدخل لقناة اتصال تمثل إمكانات الخرج  
لحادثة عشوائية يجري الرهان عليها بشكل يتسق مع احتمالاتها ، فإن

بإمكان المقامر الذي يستخدم المعرفة الموفرة له من خلال الرموز المستقبلية أن يزيد أرباحه بشكل أساسي . تساوي السرعة الأساسية العظمى لتنامي أرباح المقامر سرعة بث المعلومات عبر القناة . يمكن تعميم هذه النتيجة لتضمين حالة الاحتمالات الاتفاقية .

وهكذا نصادف حالة تلعب فيها سرعة البث دوراً رئيسياً على الرغم من عدم التطرق لقضية الترميز ضمن الحالة المعتمدة . أما فيما مضى فلم يكن لهذه الكمية من أهمية إلا عبر نظرية لشاتون أكدت أنه باستخدام الترميز المناسب يمكن بث الأرقام الثنائية عبر القناة وفق السرعة المشار إليها وبأقل خطأ ممكن .

وفي لغة الأعداد يساوي عامل ازدياد أرباح المقامر :

ن د  
٢

حيث ن هو عدد مرات المراهنة ، ر هو العدد الوسطي لواحدات البيت من المعلومات التي تبث للمراهن في كل مراهنة .

إذا بدأ هذا التطبيق ثافها ، فعلى القارئ أن يتأمل حقيقة أنه التفسير الرياضي الوحيد المكتشف إلى جانب التطبيق المعلوماتي الذي قدمنا له فيما مضى من فصول .

يمكن أن يخطر على البال ، لدى تقديم نظرية المعلومات ، إمكانية أخرى لاستخدام نظرية المعلومات غير البحث عن تفسير مستحدث لـ سرعة البث . نشر شاتون عام ١٩٤٩ بحثاً طويلاً بعنوان : « نظرية الاتصالات للأجهزة السرية » . إلا أنه من المشكوك فيه أن يكون هذا البحث قد قدم مساهمة كبيرة لحل الشيفرات ، وإن كان قد هيا ولأول مرة نظرية متكاملة عن الوثائق السرية وتحليلها ويعتبر لذلك مادة غنية للمتخصص في هذا المجال .

ربما أننا لن نستطيع الخوض في تفاصيل هذا البحث ، إلا أنني سأحاول إعطاء فكرة عن محتواه .



ماذا تكون عليه حالة محلل الوثائق السرية عندما يضع يده على رسالة جرى ترميزها بطريقة مجهولة ، انه يجهل أمرين اثنين : الرسالة نفسها وطريقة ترميزها التي يمكن ان نطلق عليها اسم المفتاح .

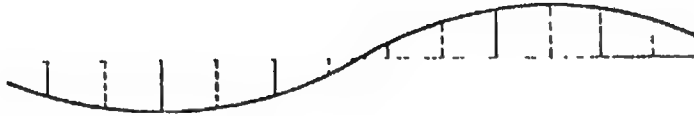
يحدث في بعض الاحيان ان يكون المحلل ملماً بالاساليب العامة للترميز . وكمثال بسيط يمكن ان يفترض المحلل ان الترميز جرى باستبدال كل حرف من الابجدية بحرف آخر وفق قواعد محددة .

يمكن ان تكون الرسالة المعروضة للمحلل طويلة او قصيرة ، واذا احتوت على ثلاثة احرف فقط مثلاً : الت ، امكنة تفسيرها بكلمة : نهر ، او كلمة : قمر او اي كلمة اخرى مؤلفة من ثلاثة احرف مختلفة . اذا كبرت الرسالة . فان عدد النصوص الممكنة ينقص بالمقابل ، واذا كانت الرسالة كبيرة بما فيه الكفاية ، لا يبقى من تفسير لها الا نص واحد مقابل وحسب .

عبر شاتون عن نقص الرتبة هذا المتعلق بالنص الحقيقي الذي جرى ترميزه بشكل يقيم الرسالة المعنية على انها مجرد تغيير في الالتباس . تعطي الرتبة ت ( س ) المعرفة في الفصل الثامن درجة الالتباس في النص الحقيقي الذي تم ترميزه بهدف الوصول الى الرسالة قيد البحث . استطاع شانون اجراء حسابات اثبت بموجبه ان هذه الرتبة تتناقص بازدیاد عدد الاحرف في الرسالة . وعندما تصبح هذه الرتبة مساوية للصفر ، فانه لا يبقى الا امكانية واحدة للنص الذي جرى ترميزه ، ويصبح من حيث المبدأ حل الرسالة المعنية ممكناً .

ما هي انواع المشاكل التي واجهت او تواجه الآن نظري المعلومات ؟ تتعلق بعض هذه المشاكل بمسألة اخذ العينات يستخدم نظري المعلومات تكنيك اخذ العينات بهدف تمثيل اشارة مستمرة متغيرة ذات حزام تواترات محددة بواسطة سلسلة من الاعداد هي في الواقع ساعات الاشارة مأخوذة كل  $\left( \frac{1}{2^s} \right)$  ثانية ، حيث س هو عرض حزام الاشارة .

ان مجموعة العينات الممكنة الاشارة محدودة الحزام ليست وحيدة من نوعها ، اذ يمكن اخذ هذه العينات عند لحظات متفاوتة . وهكذا فوق الشكل ١٤ - ١ يمكن ان تكون الخطوط الشاقولية المستمرة هي العينات المنشودة او الخطوط الشاقولية المتقطعة ، او اي خطوط اخرى مأخوذة عند نقاط اخرى . وفي الواقع ليس من الضروري ان تفصل العينات عن بعضها بفترات زمنية متساوية ، بشرط ان تؤخذ ٢ من عينة في كل ثانية .



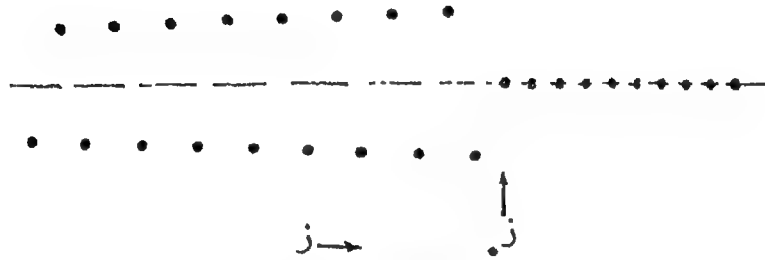
الشكل ١٤ - ١

ان شرط تمثيل الاشارة المحدودة الحزام بشكل وحيد باستخدام ٢ من عينة في كل ثانية هو استخدام كل العينات بدءاً من لحظة لا نهائية في الماضي وحتى لحظة لا نهائية في المستقبل الا أننا قد نحتاج في بعض الاحيان لاعتبار جزء من الاشارة محدودة الحزام ، او اشارة محدودة الحزام معدومة تقريباً باستثناء فترة محددة من الوقت ، ونرغب بتمثيل هذه الاشارة بدلالة العينات .

اول ما يخطر على البال هو السؤال المتعلق بتمثيل اشارة قصيرة او جزء من اشارة بسلسلة متناهية من العينات دون الاخذ بعين الاعتبار للتقنيات السابقة او اللاحقة . للأسف ان اعتبار عدد متناه من العينات لن يحدد اشارة وحيدة محدودة الحزام ، اذ يمكن ان تمر اشارات مختلفة محدودة الحزام عبر هذا العدد المتناهي من لعينات ، واذا كانت الاشارات ذات سمات كبيرة خارج نطاق العينات المعتبرة فان الاشارات ضمن هذا النطاق ستكون مختلفة بالتالي .

صحيح أن هذا قد يبدو فشلاً ، ولكننا نستطيع تحديد عينات معينة متتالية ونصطلح على أن كل العينات السابقة والتالية لهذه المجموعة هي عينات صفرية بمعنى أن كلا منها تساوي الصفر ، إذ نستطيع أن نتصور أن الإشارة المعتبرة ضمن النطاق المحدد ستفق مع العينات المعتبرة ، بينما ستكون إشارة صفرية تقريباً حثيماً تكون العينات صفرية .

نفرض على سبيل المثال مجموعة من العينات تصبح صفرية بعد لحظة ز ، بينما تكون غير صفرية قبل هذه اللحظة ، كما في الشكل ١٤ - ٢ تمثل هذه العينات إشارة وحيدة محدودة الحزام ، ببساطة لأنها مأخوذة عند كل الأزمنة بدءاً من الماضي وحتى المستقبل . هل ستكون هذه الإشارة صفرية فعلاً بعد اللحظة ز ؟



الشكل ١٤ - ٢

للأسف ، أثبت هـ . و . بولاك من مختبرات بيل أن هذه النتيجة ليست لازمة . نفرض أننا نتساءل عن الجزء من القدرة الكلية لهذه الإشارة الذي يحمله قسم الموجة الحادث بعد عشرة ثواني أو عشرين دقيقة أو ربما بعد خمسين سنة من اللحظة ز ، نتذكر في هذا السياق أن كل العينات صفرية بعد اللحظة ز .

تتلخص الإجابة المدهشة لهذا التساؤل في أن نصف قدرة الإشارة تقريباً يمكن أن يجهل على القسم من الإشارة الحادث بعد أي لحظة زمنية تبسم بكونها فاصلة بين قيم العينات غير الصفرية قبلها ، وقيم

العينات الصفرية بعدها . وهكذا فقد تكون الإشارة صفرية عند كل لحظة بعد ز. تؤخذ عندها أي عينة ، وفي نفس الوقت غير صفرية فيما بين هذه العينات .

لا تزال الجهود المبذولة لتمثيل الاشارات المحدودة الطول باستخدام العينات تتمتع عبر عوائق رياضية ، ويعمل الرياضيون ما يستطيعونه لشق الطريق بين هذه العقبات .

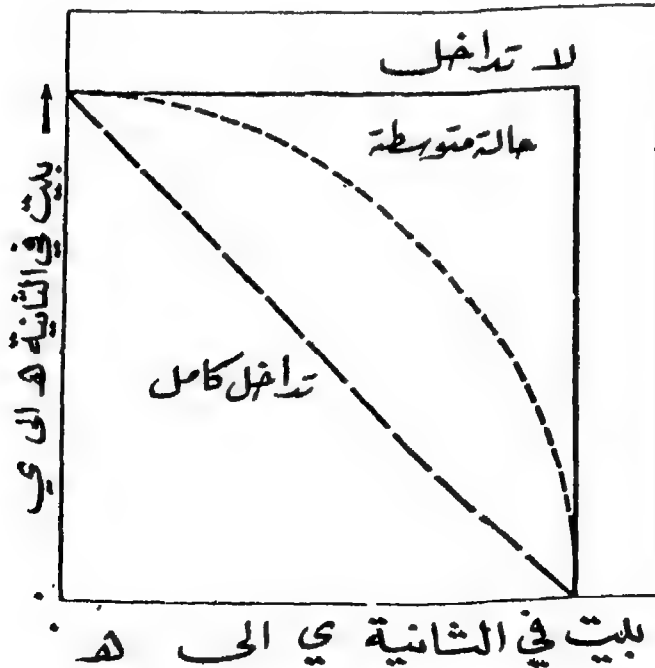
يشير عملا بولاك وسليبيان الى أن كلا طريقتي أخذ العينات والامواج الجيبية ليستا الطريقتين المناسبتين لتمثيل الاشارات المحدودة زمنيا ، وقد وظف هذان الرياضيان توابع رياضية أخرى لتحقيق التمثيل المطلوب دعيت بالتوابع الكروية المتطاولة .

يوضح المثال التالي جانباً محيراً من نظرية المعلومات . نفرض أننا نمثل في مبرقة النقطة نبضة موجبة والخط بنبضة سالبة ، ونفرض أن أحداً من محبي الدعابات عكس الوصلات الكهربائية بحيث يتم استقبال سالبة عندما يتم إرسال نبضة موجبة والعكس بالعكس . تؤكد نظرية المعلومات أن سرعة الإرسال ستبقى نفسها في هذه الحالة لأن هذا العمل لم يقدم أي رية إضافية . إلا أننا سنشعر أن ضرراً ما قد حل بنظام الاتصال ، وسيكون هذا الضرر أكبر إذا طبع جهاز الاستقبال حرفاً مغايراً للحرف المرسل وانسحب ذلك على كل الأحرف .

أقض هذا المثال مضجع شاتون طعمد إلى صياغة نظرية تغطي الوضع الناشئ عنه ، إذ عرف من خلالها معياراً للأمانة . وهكذا يفرض شاتون عقوبة معينة على استبدال الحرف الصوتي بحرف ساكن وعقوبة أخف على استبدال الحرف الصوتي بحرف صوتي آخر . ثم يعمد إلى تقييم الضرر الحادث للرسالة بسبب الأخطاء المتسقة أو الأخطاء العشوائية . إذا كان الضرر ناجماً عن الأخطاء العشوائية لقناة ذات ضجيج ، يوضح شاتون كيفية تصفيره إلى حد أدنى ، كما يبين عدد واحداث البيت في كل ثانية اللازمة لبث الإشارة بدرجة معينة من الأمانة .

انجز شاتون أيضا عملاً ضخماً فيما يتعلق ببحث الرسائل عبر الشبكات التي تتداخل فيها رسالة مع أخرى . ان أبسط أنواع هذا التداخل هو حالة قناة وحيدة تبث عبرها رسالتان باتجاهين متعاكسين بين نقطتين منها ه ، ي . نفرض بهدف التسهيل ان مواصفات عمل القناة هي نفسها في الاتجاهين ه ي ، ي ه .

نقوم برسم الخط البياني الممثل للعلاقة بين سعة القناة في الاتجاه ه ي ، وسعة القناة في الاتجاه ي ه ، وهو الخط المبين في الشكل ١٤ - ٣ نتخيل حالتين بسيطتين ، في الاولى لا يحدث تداخل بين الاشارة المنطلقة من ه الى ي وبين الاشارة المنطلقة من ي الى ه . يتكون الخط البياني الممثل لهذه الحالة من الجزء الافقي المستمر الممثل لسعة القناة من ي الى ه والجزء الشاقولي المستمر لسعة القناة من ه الى ي .



الشكل ١٤ - ٣

أو نستطيع ان نتخيل ان ارسالنا عند لحظة معينة سيقصر على احد الاتجاهين هـ الى ي ، أو ي الى هـ . وهكذا اذا حافظنا على جهة الارسال هـ في ثلث الحالات ، فان الارسال في الاتجاه المعاكس ي هـ سيستغرق ثلثي الحالات الباقية ، وهكذا يجب ان يكون مجموع سعتي القناة في الاتجاهين هـ ي ، ي هـ ثابتا في هذه الحالة والنتيجة هي الخط المتقطع المائل بزاوية ٤٥° في الشكل ١٤ - ٣ .

اما في الحالة المتوسطة حيث يكون هناك شيء من التداخل بين الارساليين في الاتجاهين نحصل على منحني كذلك المتقطع في الشكل ١٤ - ٣ .

لا زالت مشكلة الترميز الفعال الموجه الرئيسي لاعمال الباحثين في نظرية المعلومات ، ففي قناة متقطعة يسمى هؤلاء لتصحيح عدد من الاخطاء في سلسلة من الارقام الثنائية المرسل .

يركز هؤلاء الباحثون جهودهم ايضا للحصول على احسن ترميز معلوماتي عبر قناة مستمرة ذات ضجيج . نشر شاتون عام ١٩٥٩ بحثا مطولا توصل فيه الى الحدين الاعلى والادنى لسرع انتشار الاخطاء الطرق ترميز مختلفة التعقيد وذلك في حالة قناة مستمرة ذات ضجيج غاوسي . تفضل الآن الرموز الملتفة ورموز فيتري ويسعى عباقرة الرياضيات الى رموز أجود وأرخص .

ولا يقتصر البحث عن طرائق جديدة للترميز على هؤلاء الباحثين ، بل يتعداهم الى المهندسين الساعين لتحسين الاتصالات الكهربائية والذين يجربون ترميز الاشارات التلفزيونية والصوتية بأقل عدد ممكن من الارقام الثنائية ، وقد سبق ان تعرضنا لمحاولاتهم في الفصل السابع . تزداد اهمية الترميز الفعال خاصة لان الارسال الرقمي للاشارات ( كما في تعديل ترميز النبضات ) اخذ يحل تدريجيا محل الاتصالات التماثلية ، وسترزاد تلك الاهمية اكثر واكثر عندما تعم طريقة الترميز بهدف الحفاظ على السرية والخصوصية اذ ان انجع الوسائل للحفاظ على السرية هي الوسائل الرقمية .

يسعى المهندسون أيضا لابتداع طرائق بسيطة وفعالة لتصحيح الأخطاء خاصة تلك التي تحدث أثناء إرسال الإشارات الرقمية عبر الدارات الهاتفية يزداد استخدام أسلوب الإرسال الرقمي في كل المجالات العسكرية والمدنية . تمتد خطوط الهاتف تقريبا في كل مكان ، وللمحافظة على سرعة بث جيدة للمعلومات نستخدم دارات صوتية . هنا يمكن اصلاح الأخطاء باكتشافها وإعادة بثها ، إلا أن استخدام الترميز لاصلاح الأخطاء هو أمر مفضل أيضا .

تفرض بعض الظروف الخاصة طرقا معينة للتعديل ، من هذه الظروف حالة الراديو المتحرك ، ففي المدن تصل الإشارات إلى السيارات بعد ارتدادها عن مجموعة من الابنية وهكذا يتم استقبال نبضة قصيرة كمسحة من النبضات التي ارتحلت عبر مسافات مختلفة وفي مسارات متباينة . تحتاج هذه الحالة الى دراسة متأنية لاكتشاف أحسن السبل في استخدام حزام من التواترات بالغ العرض بهدف تحسين البث .

تطرح الاتصالات العسكرية ، خاصة في مواجهة التشويش ، عددا من المشاكل الهامة .

قد يعتقد البعض أن كل هذا ليس إلا ترفا هندسيا لا يقارن بالافاق الفلسفية التي تفتحها امامنا نظرية المعلومات . هل يمكن للفهم المستند الى الاعلام ، او للتقدير المحبب للطبيعة ، وكذلك للمزايا والفروق بين الرسامين الانطباعيين الفرنسيين او الواقعيين الهولنديين ، من أن يكون ذي معنى كما في حالة المواجهة المفاجأة لفن جديد وغريب كالفن الياباني .

إلا أن الناقد الفني الذي يتابع باخلاص كل التفاصيل لا شك سيحوز في النهاية بصيرة وقيما سليمة مثلما سيكون عليه حال هاوي الفنون المرهف الحس . يبدو أن هناك أحكاما تثقيفية تفرض تقييم انتاج معين لما هو عليه وليس بسبب تأثيره على عقول الناس غير المسلمين به . أتمنى أن يكون لهذا الكتاب جوانبه المثيرة ، إلا أنني لا أبغي من ورائه تكوين وجهة نظر لدى القارئ عن نظرية المعلومات تختلف عن تلك التي يتمسك بها العاملون ذوو الخبرة في هذه النظرية ، إذ من الأفضل أن أنهي هنا الكتاب في أجواء متماسكة رزينة .





## ملحوظات رياضية

يملك القارئ ملء حريته في استخدام أو عدم استخدام الرياضيات الواردة في هذا الكتاب بما في ذلك عدد من العلاقات الموزعة هنا وهناك ، ولربما اذا هو تعامل مع رياضيات هذا الكتاب ، لحكم عليه انه اولا وآخر كتاب رياضي .

نعم انه كتاب رياضي ، فنظرية الاتصالات هي نظرية رياضية ، ولان هذا الكتاب يعرض لهذه النظرية ، فهو ملزم لذلك بالرياضيات . يجب على القارئ في هذا السياق ان يميز بين الرياضيات وبين المصطلحات المستخدمة . اذ يمكن للكتاب ان ينطوي على كم كبير من الرياضيات من دون ان يحتوي على رمز واحد او اشارة مساواة .

لقد تطرق الهنود البابليون الى معالجات رياضية واسعة بما في ذلك اجزاء هامة من الجبر ، وذلك دون ان يستخدموا أكثر من الكلمات والجمل ، اذ ان المصطلحات الرياضية ولدت بعد ذلك . تهدف هذه المصطلحات الى تبسيط الرياضيات ، وهي تحقق هذا الغرض فعلا لمن يصبح ملماً بها . اما ما تفعله المصطلحات المذكورة فهو استبدال سلاسل طويلة من الكلمات المتواترة الاستعمال برموز بسيطة ، وتوفير أسماء بسيطة للكميات التي نتحدث عنها ، كذلك تهنيء لصياغة دقيقة للعلاقات وعرضها من ثم بشكل بياني بحيث تدرك العين في نظرة واحدة ارتباطات الكميات ببعضها تلك الارتباطات التي لن تظهر وستضيع بين ثنايا الجمل الواصفة لها ، وستفوت فرصة كبيرة لادراك الصيغة الكلية للجمل والعلاقات دفعة واحدة .

وهكذا يقتصر دور المصطلحات الرياضية على تمثيل الرياضيات والتعبير عنها ، تماماً كما تمثل الأحرف الكلمات والعلامات الموسيقى . يمكن أن تمثل المصطلحات الرياضية ما لا معنى له أو لا شيء تحديداً ، كما في حالة الأحرف أو العلامات الموسيقية المرصوفة بشكل عشوائي . ينشأ بعض غربي الأطوار أحياناً نصوصاً مليئة بالمصطلحات الرياضية وهي لا تعني في واقع الأمر أي نوع من الرياضيات .

حاولت في هذا الكتاب أن أضع كل الأفكار الهامة في كلمات وجمل ، ولأن المصطلحات الرياضية تمنح فرصة أكبر للفهم المبسط للأشياء فقد عمدت في معظم الحالات إلى اقحام هذه المصطلحات في صلب البحث . لقد شرحت ذلك عبر هذا الكتاب إلى حد ما ، وسأعرض هنا وجيزاً لهذه الشروح . وكذلك سأجرؤ على طرح بعض القضايا البسيطة المرتبطة التي لم تستخدم في هذا الكتاب آملاً أن يفيد منها القارئ في مجالات أخرى .

أول ما يواجهنا في المصطلحات الرياضية هو استخدام الأحرف لتمثيل الأعداد وأشياء أخرى أيضاً ، ففي الفصل الخامس مثلاً استخدمنا الرمز  $\mathbb{Z}$  للدلالة على زمرة الأعداد الصحيحة ، أو سلسلة من الرموز أو الأحرف ، ربما زمرة من الأحرف ، بينما وظف الرمز  $\mathbb{Z}$  لتمييز أي الزمر نعني . يمكن مثلاً في حال كون الرمز  $\mathbb{Z}$  مساوياً الواحد أن تكون الزمرة  $\mathbb{Z}$  بالمقابل هي  $\mathbb{Z}$  ، بينما لقيمة أخرى مثل ١٢١ ، قد تكون الزمرة  $\mathbb{Z}$  أي  $\mathbb{Z}$  .

نستخدم في حياتنا العمليات الأربعة المعتادة : الطرح ، الضرب ، التقسيم ، والجمع بشكل متواتر . نستخدم أحياناً الأحرف للدلالة على الأرقام الواردة في هذه العمليات : مثلاً :

$$\begin{array}{lcl} \text{الجمع :} & ٢ + ٣ & \\ & ٢ + ٣ & \end{array}$$

نقرأ العملية الثانية على الشكل :  $T$  زائد  $D$  ، ونفسرها على أنها حاصل جمع عددين يمثل أحدهما  $T$  ويمثل الآخر  $D$  .

$$\begin{array}{l} \text{الطرح :} \\ ٥ - ٤ \\ \text{ك - ر} \end{array}$$

بالمثل نقرأ العملية الثانية ك ناقص  $R$  .

$$\begin{array}{l} \text{الضرب :} \\ ٣ \times ٥ \text{ أو } ٥ \cdot ٣ \text{ أو } (٣) (٥) \\ \text{س} \times \text{ع أو س} \cdot \text{ع أو (س) (ع)} \end{array}$$

إذا لم نستخدم الأقواس في التمثيل الأخير لقراءنا الجداء  $٣ \times ٥$  على أنه العدد  $٥ \cdot ٣$  . نستطيع استخدام الأقواس للدلالة على جداء أي كميات نرغب بضربها ، مثلاً يمكننا كتابة  $س \times ع$  على الشكل  $(س) (ع)$  ، إلا أننا لا نحتاج ذلك في معظم الحالات . نقرأ  $(٣) (٥)$  على الشكل  $٣$  ضرب  $٥$  ، بينما نقرأ  $س \times ع$  كحرفين متتالين :  $س \times ع$  بدلاً من قراءتهما على الشكل  $س$  ضرب  $ع$  .

$$\begin{array}{l} \text{التقسيم :} \\ ٦ \div ٣ \text{ أو } \frac{٦}{٣} \text{ أو } ٦ / ٣ \\ \frac{١}{ص} \text{ أو } ١ / ص \end{array}$$

نقرأ عادة  $\frac{١}{ص}$  وفق العبارة  $١$  على  $ص$  وليس  $١$  تقسيم  $ص$  .

تعامل الكميات المتضمنة في أقواس كعدد واحد ، مثلاً :

$$٢ = \frac{٦}{٣} = \frac{(٤+٢)}{٣}$$

$$\begin{array}{l} ٢٤ = (٢) (١٢) = (٢) (٨ + ٤) \\ \text{ح} \times \text{ب} + \text{ح} \times \text{أ} = \text{ح} \times (\text{ب} + \text{أ}) \end{array}$$

نقرأ ( ٢ + ب ) على الشكل ٢ زائد ب ، أو على الشكل : الكمية ٢ زائد ب ، إذا أدى الشكل الأول لبعض التشويش . وهكذا إذا قلنا ح ضرب ٢ زائد ب لكان المعنى الممكن : ح ٢ + ب على الرغم من أننا نقرأ العبارة الأخيرة وفق ما يلي : ح ٢ زائد ب . أما إذا قلنا ح ضرب الكمية ٢ زائد ب لكان واضحاً أننا نعني : ح ( ٢ + ب ) .

استخدم مفهوم الاحتمال في هذا الكتاب بشكل متواتر . يمكن أن نقول مثلاً أن احتمال الرمز ذي الترتيب م في سلسلة من الرموز هو ح ( م ) . نقرأ ذلك وفق العبارة : ح ل م .

يمكن أن تكون الرموز كلمات ، أعداد ، أو أحرف ويمكن أن نتصور جدولة الرموز حيث تشير أعداد مختلفة للقيم الممكنة للرمز م مثلاً وما يقابل هذه القيم من أحرف . يوضح الجدول التالي هذه الفكرة :

الحرف المقابل	قيمة م
أ	١
ب	٢
ت	٣
ث	٤
ج	٥
ح	٦
.	.
.	.
.	.
الخ	الخ

عندما نود الإشارة إلى احتمال حرف معين ، ج مثلاً ، نستخدم المصطلح ح ( ج ) لأن العدد ج يحدد الحرف ج في الجدول ، إلا أننا نكتب عوضاً عن ذلك وبهدف التبسيط ح ( ج ) .

ما هو هذا الاحتمال ، انه نسبة عدد مرات ورود الحرف المعني الى عدد الاحرف الكلي في مقطع معين . وهكذا اذا ورد الحرف ي ١٣٠٠٠٠ مرة في نص يحتوي على ١٠٠٠٠٠٠ حرف كان ح ( ي ) مساوياً لـ :

$$\text{ح ( ي )} = \frac{١٣٠٠٠٠}{١٠٠٠٠٠٠} = ٠.١٣ = ١٣ \%$$

نتحدث أحياناً عن احتمال وقوع حادثين معاً ، إما في وقت واحد ، او على التتابع . نستخدم مثلاً الحرف س للدلالة على الإشارة المرسلة والحرف ص للدلالة على الإشارة المستقبلية ، ويكون المصطلح ح (س،ص) دالاً في هذه الحالة على ارسال س واستقبال ص . نقرأ هذا المصطلح وفق العبارة : احتمال س ص حيث نعبر عن الفاصلة بوقفة قصيرة يمكن مثلاً أن نرسل على وجه التخصيص الحرف و ونستقبل الحرف ب ، ويكون احتمال هذا الحادث ح ( و ، ب ) ، أما الامثلة الأخرى عن ح ( س ، ص ) فكثيرة منها : ح ( ٢ ، ٢ ) ، ح ( ك ، د ) ، ..... الخ حيث ان كل هذه الامثلة تنتج عن تعويضات مناسبة في المصطلح ح ( س ، ص ) .

نتعامل أيضاً مع الاحتمالات الشرطية . مثلاً إذا أرسلنا س ، ما هو احتمال أن نستقبل ص ، نستخدم على كتابة هذا الاحتمال الشرطي بالرمز ح ( ص | س ) ونقرأه وفق العبارة ح | س بدلالة س . يستخدم بعض المؤلفين المصطلح ح ( س | س ) للدلالة على الاحتمال الشرطي والذي يقرأ على الشكل : احتمال ص لدى توفر س . استخدمت شخصياً المصطلحات التي بناها شاتون في بحثه الاصيل عن نظرية الاتصالات .

نكتب الآن علاقة رياضية بسيطة ثم نحاول تفسيرها :

$$\text{ح ( س ، ص )} = \text{ح ( س )} \times \text{ح ( ص | س )}$$

أي أن احتمال مواجهة س ، ص سوية تساوي احتمال مواجهة س لوحدها مضروباً في احتمال مواجهة ص عندما تكون قد واجهنا س للتو يمكن أن نصيغ هذا التفسير بشكل آخر فنقول إن عدد مرات ورود المشترك للرمزين س ، ص يساوي عدد مرات ورود الرمز س مضروباً بنسبة ورود الحرف ص بالقلونة مع الأحرف الأخرى .

نحتاج في كثير من الأحيان لجمع عدد من الأشياء مع بعضها ، فمثل هذه العملية بالرمز  $\Sigma$  وهو مقلوب الحرف اليوناني سيكما . نفرض أن الرمز ص يمثل عدداً صحيحاً ، أي أن ص يمكن أن يكون ٠ ، ١ ، ٢ ، ٣ ، ..... الخ ونفرض أننا نود ترميز المجموع :

$$٨ + ٧ + ٦ + ٥ + ٤ + ٣ + ٢ + ١ + ٠ .$$

الذي يساوي بالطبع ٣٦ . نكتب هذا المجموع على الشكل :

$$\begin{array}{l} \text{ص} = ٨ \\ \text{ص} = ٧ \\ \text{ص} = ٦ \\ \text{ص} = ٥ \\ \text{ص} = ٤ \\ \text{ص} = ٣ \\ \text{ص} = ٢ \\ \text{ص} = ١ \\ \text{ص} = ٠ \end{array}$$

ونقرؤه : مجموع ص من ص تساوي صفر وإلى ص تساوي ٨ . هنا يعني الرمز  $\Sigma$  مجموع ، بينما المساواتان ص = ٠ ، ص = ٨ تعنيان من ص = ٠ إلى ص = ٨ . وأخيراً يعني ورود ص على اليسار أن ما نجمعه هو الأعداد الصحيحة ذاتها .

يمكن أن تكون هناك كميات مختلفة يلعب ص بالنسبة إليها دور الدليل . مثلاً احتمالات الأحرف وفق الجدول التالي :

قيمة ص	الحرف المقابل	احتمال الحرف ح (ص)
١	ا	٠.٣١٠٥
٢	ب	٠.٠٤٦٨
٣	ت	٠.٨١٥١
٤	ث	٠.٧٩٩٥
٥	ج	٠.٧٠٩٨
٦	ح	٠.٦٨٨٢
٧	خ	٠.٦٣٤٥
٨	د	٠.٦١٠١
٩	ذ	٠.٥٢٥٩
١٠	ر	٠.٣٧٨٨
١١	ز	٠.٣٣٨٩
١٢	س	٠.٢٩٢٤
١٣	ش	٠.٢٧٥٨
١٤	ص	٠.٢٥٣٦
١٥	ض	٠.٢٤٥٩
١٦	ط	٠.١٩٩٤
١٧	ظ	٠.١٩٨٢
١٨	ع	٠.١٩٨٢
١٩	غ	٠.١٥٣٩
٢٠	ف	٠.١٤٤٠
٢١	ق	٠.٠٩١٩
٢٢	ك	٠.٠٤٢٠
٢٣	ل	٠.٠١٦٦
٢٤	م	٠.٠١٣٢
٢٥	ن	٠.٠١٢١
٢٦	هـ	٠.٠٠٧٧
٢٧	و	٠.٠٠٣٠
٢٨	ي	٠.٠٠١٠

إذا أردنا جمع هذه الاحتمالات لكتبنا :

$$\begin{array}{c} ٢٨ \\ \text{ص} = \text{ح} ( \text{ص} ) \end{array}$$

ونقرأ هذا المجموع : مجموع ح ( ص ) من ص تساوي ١ الى ٢٨ تساوي هذه الكمية الى الواحد تقريبا . إن نسبة عدد مرات ورود الحرف ١ في كل حرف مضافة الى النسبة المقابلة في حالة ب وهكذا لكل الأحرف يصل بنا الى نسبة ورود أي حرف في الحرف أي ١ .  
إذا كتبنا :

$$\begin{array}{c} \text{ح} ( \text{ص} ) \\ \text{ص} \end{array}$$

فنعني المجموع لكل قيم ص ، أي كل ما يمثل أي شيء . ونقرؤه : مجموع ح ( ص ) عبر ص . إذا كان ص حرفاً أبجدياً فسننفذ عملية الجمع ال ٢٨ احتمالا مختلف .

نتعامل أحيانا مع تعابير تتضمن حرفين مثل س ، ص ونرغب بإجراء عملية الجمع بالنسبة لأحد هذين الدليلين . يمكن أن يكون الرمز ح ( س ، ص ) هو احتمال ورود الحرف س متبوعاً بالحرف ص ، في حالة زوج الأحرف ر د مثلا . يكون هذا الاحتمال : ح ( ر ، د ) ، ونكتب بشكل مشابه :

$$\begin{array}{c} \text{ح} ( \text{س} ، \text{ص} ) \\ \text{ص} \end{array}$$

ونقرأ هذا المجموع : مجموع ح د س ، ص عبر ص ، يعني ذلك اعتبار كل قيم ص الممكنة وإجراء المجموع عبرها .

$$\begin{array}{c} \text{ح} ( \text{س} ، \text{ص} ) = \text{ح} ( \text{س} ) \\ \text{ص} \end{array}$$



ونقرأ هذه العلاقة : مجموع ح د ر س ، ص عبر ص يساوي ح د ر س .  
 بشكل أوضح : اذا جمعنا احتمالات ورود كل حرف بعد حرف معين  
 نحصل ببساطة على احتمال ورود هذا الحرف ، لان ورود الحرف المعني  
 سيترافق بورود حرف تالٍ له .

نحتاج لتمثيل عدد مضروب في نفسه مرات متتالية ، اضافة  
 لاستخدامنا الجمع والطرح والضرب والتقسيم . فمثل هذه العملية  
 بالرمز :  $2^2 = 2$

اي ان العدد المضروب بنفسه هو ٢ ، بينما عدد مرات ضربه بنفسه  
 في هذا المثال الخاص هو مرة واحدة .

$$2^4 = 2$$

اي ٢ مرفوعة للقوة ٢ ، ١ وهو مربع ال ٢ .

$$2^8 = 2$$

اي ٢ مرفوعة للقوة ٣ ، وهو مكعب ال ٢ ، اي ٢ مضروبة بنفسها  
 ثلاثة مرات .

نسمي في هذه الامثلة ٢ بالاساس ، بينما ١ ، ٢ ، ٣ كل منها قوة  
 او أس .

وبشكل عام اذا كتبنا  $2^n$  فتعني ٢ مضروبة بنفسها ن مرة .

يجب ان نضيف الى ذلك ، بهدف الإبقاء على الاتساق في الرياضيات

$$2^1 = 2$$

التعريف التالي :

اي اننا اذا رفعنا اي عدد للقوة . كان الناتج واحد على الدوام  
بصرف النظر عن هذا العدد .

تستخدم الرياضيات ايضا الاس الكسري او السالب :

$$2^{-1} = \frac{1}{2^1} = \frac{1}{2}$$

$$\frac{1}{2} = 2^{-1}$$

من خصائص القوى :

$$2^3 + 2^2 = 2^3 \times 2^2$$

وكاملة على ذلك نكتب :

$$11 = 7 \times 4$$

$$\frac{11}{4} = 2.75$$

$$\frac{11}{4} = 2.75$$

اما التابع الرياضي الهام الذي استخدمناه في هذا الكتاب فهو  
اللوغاريتم . يمكن للوغاريتم ان يتخذ اي اساس ، الا ان الاس الذي  
استخدمناه في هذا الكتاب هو 2 . اذ اعطينا عددا ما ، يعرف لوغاريتم  
هذا العدد من الاساس 2 على انه القوة او الاس التي اذا رفعنا اليها  
العدد 2 كان الناتج هو العدد المعطى لنا ونشير الى هذا اللوغاريتم  
بالمصطلح لع س حيث س هو العدد المعطى لنا . وهكذا يكون لدينا وفق  
هذا التعريف :

$$x^s = 2^s$$

مثلاً :

$$لع ٨ = ٢ = ٢ = ٢ = ٢ = ٢ = ٢ = ٢$$

ندرج هنا بعض اللوغاريتمات من الأساس ٢ :

العدد س	لوغاريتمه لع س
١	٠
٢	١
٤	٢
٨	٣
١٦	٤
٣٢	٥
٦٤	٦

نوجز بعض خواص اللوغاريتم فيما يلي :

$$لع (٢ \times ب) = لع ٢ + لع ب$$

$$لع \frac{٢}{ب} = لع ٢ - لع ب$$

$$لع \frac{ن}{ح} = لع ن - لع ح$$

لا تستخدم اللوغاريتمات من الأساس ٢ إلا في نظرية المعلومات ، بينما تستخدم اللوغاريتمات من الأساس ١٠ أو الأساس e بشكل أكبر في فروع أخرى من العلم ، علماً بأن العدد e هو العدد الطبيعي النابيري :

$$e = ٢.٧١٨$$

إذا طورنا مصطلحاتنا ، فرمزا للوغاريتم  $s$  من الأساس  $2$  بالرمز  $ل\text{ع } s$  ، ومن الأساس عشرة بالرمز  $ل\text{ع } s$  ، ومن الأساس  $e$  بالرمز  $ل\text{ع } s$  ، لحصلنا على العلاقات التالية :

$$\frac{ل\text{ع } s}{ل\text{ع } 10} = ل\text{ع } 10 \times ل\text{ع } s = ل\text{ع } 2$$

$$ل\text{ع } s = ل\text{ع } 2 \times ٣٣٢$$

$$\frac{ل\text{ع } s}{ل\text{ع } e} = ل\text{ع } e \times ل\text{ع } s = ل\text{ع } ٢$$

$$ل\text{ع } s = ل\text{ع } ٢ \times ١٤٤$$

تدعى اللوغاريتمات من الأساس  $e$  باللوغاريتمات الطبيعية ولها بعض الخصائص الرياضية البسيطة والهامة . مثلاً إذا كان  $s$  أقل بكثير من الواحد تتحقق العلاقة :

$$ل\text{ع } s \approx (١ + s) = ل\text{ع } s$$

لقد استخدمنا هذا التقريب في الفصل الخامس .

بشير أخيراً إلى أن ورود المصطلح  $ل\text{ع } s$  في هذا الكتاب ، عنى في الواقع  $ل\text{ع } s$  .

## المؤلف في سطور

ولد الدكتور جون . ر. بيرس في ديس موينس بولاية آيوا في امريكا عام ١٩١٠ وترعرع في الغرب الاوسط الاميركي . تلقى علومه الجامعية في معهد كاليفورنيا التكنولوجي حتى حصوله على درجة الدكتوراه في الهندسة الكهربائية .

التحق عام ١٩٣٦ بشركة بيل للهاتف وشغل فيها عدة مناصب حتى عام ١٩٧١ حيث تركها وعاد الى معهد كاليفورنيا التكنولوجي حيث يعمل الآن في منصب التكنولوجي الاول في مختبر الدفع النفاث .

ظهرت مؤلفات الدكتور بيرس في مجلة العلم الاميركي ومجلة الاطلسي الشهرية ومجلة كورونيت ومجلات خيال علمي اخرى . اما كتبه الاخرى فهي : عالم الانسان الصوتي ، امواج الالكترون ورسائله ، الامواج والاذن ، انابيب الامواج المتحركة ، نظرية وتصميم الاشعة الالكترونية ، كل شيء عن الامواج ، واخيرا مقدمة الى علم وانظمة لاتصالات .

ينتمي الدكتور بيرس لعضوية عدة جمعيات علمية منها : الاكاديمية الوطنية للعلوم ، الاكاديمية الوطنية للهندسة ، الاكاديمية الاميركية للفنون والعلوم ، الاكاديمية السويدية الملكية للعلوم ، نقابة المهندسين الالكترونيين والكهربائيين ، جمعية الفيزياء الامريكية ، وجمعية الصوتيات الاميركية .

نال الدكتور بيرس عشر درجات تقديرية وعدد من الجوائز منها : الميدالية الوطنية للعلوم ، ميدالية اديسون ، وميدالية الشرف ، جائزة مؤسسي الاكاديمية الوطنية للهندسة ، ميدالية سيدغرن ( من السويد ) وميدالية فالدمار باولسون ( من الدنمارك ) .



# الفهرس

٥	احساء المؤلف
٧	مقدمة المؤلف
	الفصل الاول :
١٠٣	العالم والنظريات
	الفصل الثاني :
٣٥	اصول نظرية المعلومات
	الفصل الثالث :
٦٧	نموذج رياضي
	الفصل الرابع :
٩١	الترميز ونظام المد الثنائي
	الفصل الخامس :
١٠٩	الانتروبي
	الفصل السادس :
١٤٥	اللفة والمعنى

	<b>الفصل السابع :</b>
١٦٧	الترميز الفعّال
	<b>الفصل الثامن :</b>
١٩١	القناة ذات الضجيج
	<b>الفصل التاسع :</b>
٢١٧	عدة أبمد
	<b>الفصل العاشر :</b>
٢٣٩	- نظرية المعلومات والفيزياء
	<b>الفصل الحادي عشر :</b>
٢٦٦	السيبرنيتيك
	<b>الفصل الثاني عشر :</b>
٢٩٥	نظرية المعلومات وعلم النفس
	<b>الفصل الثالث عشر :</b>
٣١٩	نظرية المعلومات والفن
	<b>الفصل الرابع عشر :</b>
٣٣٩	عودة الى نظرية الاتصالات
٣٥١	ملحق رياضي
٣٦٣	المؤلف في سطور